INVESTIGACION y CIENCIA

AYER Y HOY DEL SISTEMA PERIODICO

HIPERACTIVIDAD DE LOS NIÑOS Y FALTA DE ATENCION

LA TECNICA TERMOFOTOVOLTAICA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CONSERVACION DE LAS HUELLAS DE LAETOLI



NOVIEMBRE 1998
800 PTAS.



Noviembre de 1998 Número 266

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
8-9	Alfred T. Kamajian
10-13	Laurie Grace (*mapa y dibujo*), J. Paul Getty Trust y G. Aldana (*fotografías*)
14	T. Moon (*arriba, izquierda*); N. Agnew (*arriba, derecha y abajo, izquierda*); A. Bass (*centro, derecha*) y M. Demas (*abajo, dcha.*)
15	A. Bass (*arriba*), F. Long (*abajo*)
16	Jay H. Matternes
17	Cortesía del Museo Americano de Historia Natural
18	Laurie Grace (*dibujo*); T. Moon (*fotografía superior*); N. Agnew (*centro*) y M. Demas (*abajo*)
20	Centro Espacial Johnson, NASA
22	Dmitry Krasny
23	Daniels & Daniels
24	NASA (*arriba*); Centro de Vuelos Espaciales Marshall, NASA (*abajo*)
25	Centro Espacial Johnson, NASA
29-33	Leo Corry
48	Yan Nascimbene
50	Lisa Burnett (*recuadro*); F. Xavier Castellanos y Jay N. Giedd, *Instituto Nac. de Salud Mental*
51	Terese Winslow
52	Lisa Burnett
53	Stephen Rose, *Gamma Liaison*
54-55	Dan Wagner
56	Science & Society Picture Library/Museo de Ciencias, Londres
57	Corbis-Bettmann (*izquierda*); Biblioteca Van Pelt-Dietrich de la Univ. de Pennsylvania (*derecha*)
58-59	Laurie Grace
61	Peter Möller, Scientific Computers and Graphics, Inc., Los Alamos
62-63	Museo Curie (*izquierda*); “Die Geschichte der Radioaktivitat” de Cornelius Keller (*centro*); A. Zschau (*derecha*)
65	Spektrum der Wissenschaft
66-67	Pour la Science/Spektrum der Wissenschaft (*arriba y abajo centro*); A. Zschau (*abajo izquierda y derecha*)
69-71	GSI/Spektrum der Wissenschaft
72-73	Don Dixon
74	Dennis Dicicco; Michael Goodman (*inserto*)
75-76	Michael Goodman
77	Paul R. Weissman
78-79	Slim Films
80	Slim Films; Patrick Bennett (*fotografía*)
81-82	Slim Films
83	Tore Ofteness
84-85	Rick Jones
86	Roger Ressmeyer (*arriba*), Dmitry Krasny (*abajo*)
87	D. Krasny (*arriba*), David Fierstein (*abajo*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Jesús Rodríguez Méndez: *Conservación de las huellas de Laetoli*; Ana M.ª Rubio: *Efectos de la ingravidez sobre el cuerpo humano*; José M. García de la Mora: *El desorden de hiperactividad y déficit de atención*; Xavier Roqué: La *evolución del sistema periódico*; Emilio Elizalde: *La síntesis de los elementos superpesados*; Mónica Murphy: *La nube de Oort*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *De cerca* y *Juegos matemáticos*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell; Alden M. Hayashi; Madhusree Mukerjee; George Musser; Sasha Nemecek; David A. Schneider y Glenn Zorpette; Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 91 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

...cincuenta años

CIBERNÉTICA. «Cibernética es una palabra de nuevo cuño que designa un nuevo campo de la ciencia. Bajo un mismo término se amparan el estudio de lo que en un contexto humano se conoce vagamente como pensamiento y lo que en ingeniería se denomina control y comunicación. En otras palabras, la cibernética pretende descubrir los elementos comunes del funcionamiento de las máquinas automáticas y del sistema nervioso humano, para desarrollar una teoría que abarque todo el campo del control y la comunicación en las máquinas y en los seres vivos. Procede del griego *kybernetes*, timonel. Si el siglo XVII y los primeros años del XVIII fueron la era de los relojes y los últimos años del siglo XVIII y el siglo XIX fueron la era del motor de vapor, nuestro tiempo corresponde a la era de las comunicaciones y el control. —Norbert Wiener»

SEXUALIDAD VÍRICA. «Creíase antaño que la sexualidad era una cualidad exclusiva de las formas de vida superiores, pero se ha descubierto que también la poseen formas de vida más elementales. La reproducción sexual es la unión e intercambio de factores característicos entre dos progenitores para generar un nuevo individuo. Experimentos con virus que atacan a las bacterias mostraron que, dentro de una bacteria, dos o más virus “matados” (o mortalmente dañados) pueden ensamblar partes incólumes y dar origen a individuos completos, capaces de reproducirse a sí mismos. —Max y Mary Bruce Delbrück»

...cien años

CONTROL REMOTO. «El señor Nikola Tesla, de Nueva York, ha inventado lo que en ciencia naval se llama torpedo dirigible. Mientras que otros ingenios dirigibles emplean un cable de conexión para transmitir al torpedo la energía de control, el señor Tesla hace uso de las ondas hertzianas procedentes de una fuente distante (lo que se conoce más popularmente como ‘telegrafía sin hilos’) y prescinde del cable. Afirma el señor Tesla que ‘la guerra dejará de ser posible cuando el mundo entero sepa que en el futuro el más débil de los países podrá dotarse inmediatamente de un arma que haga seguras sus costas y sus puertos inexpugnables a los asaltos de todas las armadas del mundo unidas.»

AVANCES MÉDICOS. «Nos enteramos por el número de septiembre del *Fort Wayne Medical Journal Magazine* que en un examen reciente ante el Consejo Médico de Louisiana, la doctora Emma Wakefield, una joven negra, aprobó muy bien su examen. Se trata de la primera mujer que estudia medicina en el estado de Louisiana y la primera negra que recibe el título en América.»

“ZONA PELIGROSA” EN VIENA. «El brote de peste bubónica en Viena a causa de los experimentos del centro bacteriológico del profesor Nothnagle ha sembrado el terror en la capital austríaca. Además de los que produjeron las muertes del doctor Mueller y el señor Barisch, ha habido otros casos. Ya se han tomado precauciones extraordinarias para prevenir una epidemia, habiéndose aislado a todas las personas que estuvieron en contacto con el señor Barisch. Algunas de ellas trataron de escapar, pero fueron aprehendidas y confinadas. Los afectados por la peste se hallan en un edificio aislado y son atendidos por el doctor Pooch y por Hermanas de la Caridad. Es opinión de los médicos de la capital austríaca que la peste se propagará.»

EL GRAN TELESCOPIO DE PARÍS. «El Observatorio de París está reconocido como uno de los centros de la investigación astronómica, con unos astrónomos a los que se ha asociado desde los comienzos a la historia de la ciencia. El gran instrumento dotado de escaleras que mostramos en el grabado fue instalado sobre sus cimientos en 1875. Encerrado dentro de una cúpula (que no se ve en el grabado), se mueve cronométricamente merced a un regulador de Foucault y su espejo tiene un diámetro de 1,2 metros.»



El gran telescopio del Observatorio de París

...ciento cincuenta años

UN CASO FAMOSO DE NEUROLOGÍA. «El *Mercury* de Woodstock (Vermont) informa: ‘Hace pocas semanas nos referimos al asombroso caso del señor Gage, capataz del ferrocarril en Cavendish, quien al preparar una carga para volar un peñasco resultó herido al atravesarle la cabeza una barra de hierro; le entró por la mejilla y salió despedida por arriba hasta una distancia de varios metros, tras efectuar un sorprendente viaje a través del cráneo y el cerebro. Volvemos hoy a este caso para informar de que el paciente no sólo sobrevive, sino que se encuentra mucho mejor. No parece presentar otra lesión visible que la pérdida de un ojo.” [*Nota de la Redacción: Phineas Gage sobrevivió 12 años, pero con una personalidad radicalmente deforme; hoy aún sigue estudiándose como modelo de función cerebral.*]

Conservación de las huellas de Laetoli

El descubrimiento de huellas de homínidos en Africa oriental replanteó en su tiempo el estudio de los orígenes humanos. Ahora, los conservadores se esfuerzan en salvar de la destrucción las frágiles pistas

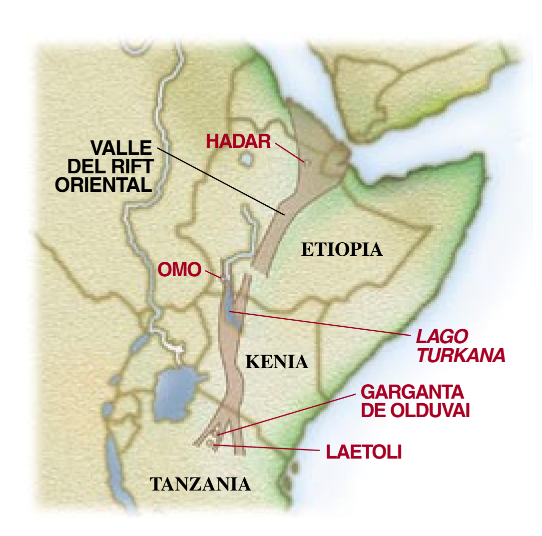
Neville Agnew y Martha Demas



1. TRES HOMINIDOS PRIMITIVOS atraviesan un paisaje cubierto de cenizas volcánicas. Hace de ello 3,6 millones de años. Un macho grande abre la marcha, mientras una hembra más pequeña camina a su lado y otro macho de tamaño mediano pisa sobre las huellas del mayor. Diversos animales del Plioceno —jirafas, elefantes e hipparion, un caballo extinto— graban también sus huellas en la ceniza.

Uno de los hechos más notables en los anales de la antropología ocurrió hace 20 años en una región del norte de Tanzania llamada Laetoli. Allí se encontraba un equipo dirigido por Mary D. Leakey buscando fósiles de los homínidos primitivos que ocuparon Africa oriental hace millones de años. En el verano de 1976, tras un largo día de trabajo de campo, tres investigadores externos al grupo de Leakey comenzaron a bromear arrojándose pellas de excrementos secos de elefante. Cuando el paleontólogo Andrew Hill se echó al suelo para esquivar una, observó lo que parecían ser rastros de animales en una capa de toba aflorante o, lo que es lo mismo, una roca sedimentaria formada por depósitos de cenizas volcánicas. Entregados a una inspección más sistemática, los científicos encontraron miles de rastros fósiles, con huellas de elefantes, jirafas, rinocerontes y muchas especies de mamíferos extintos. Pero el hallazgo más extraordinario llegó dos años después, cuando Paul I. Abell, geoquímico agregado al equipo de Leakey, encontró lo que parecía ser una huella humana en el extremo de un barranco erosionado por el río Ngarusi.





2. LA TANZANA LAETOLI se halla en la rama oriental del Gran Valle del Rift, donde han aparecido muchos homínidos fósiles. Otros yacimientos famosos de homínidos son Hadar y Omo, en Etiopía, el lago Turkana en Kenia y la garganta de Olduvai también en Tanzania.

En 1978 y 1979 las excavaciones de la Toba de las Huellas —así se daría en llamarla— revelaron dos rastros paralelos de pisadas de homínidos a lo largo de unos 27 metros. Los sedimentos volcánicos, datados por técnicas radiométricas, tenían entre 3,4 y 3,8 millones años de antigüedad. Con el descubrimiento se abrió un debate de largo alcance: las huellas de Laetoli demostraban que los homínidos primitivos eran totalmente bípedos; es decir, adquirieron una postura erguida y andaban sobre dos pies mucho antes del comienzo de la fabricación de útiles líticos o el aumento del tamaño del cerebro humano. Más aún, los rastros proporcionaron información sobre los tejidos blandos de los pies y la longitud de su zancada, información ésta que no puede recabarse de los huesos fósiles. Por todas esas razones las pisadas de Laetoli despertaron la atención de expertos y legos. Para Mary Leakey, fallecida en 1996, el descubrimiento constituía el hito que coronaba sesenta años de trabajo en Africa oriental.

Que las huellas tienen valor científico salta a la vista; merced a ellas se han resuelto cuestiones fundamentales sobre el pasado de la humanidad. Encierran también un profundo simbolismo cultural. De un modo poderosamente evocador, los rastros de esos homínidos primitivos representan la larga historia evolutiva. Las huellas transportan al espectador hasta un momento crucial del desarrollo de nuestra especie y nos hablan directamente a través de miles de milenios.

Desde hace seis años el Instituto Getty para la Conservación —una organización con sede en Los Angeles dedicada a la protección del patrimonio cultural— ha trabajado con las autoridades tanzanas para asegurar que las huellas de Laetoli permanezcan intactas. Un equipo interdisciplinar de expertos acaba de concluir un proyecto para protegerlas de la erosión, el crecimiento de la vegetación y otras causas de deterioro que han amenazado las pisadas desde su descubrimiento.

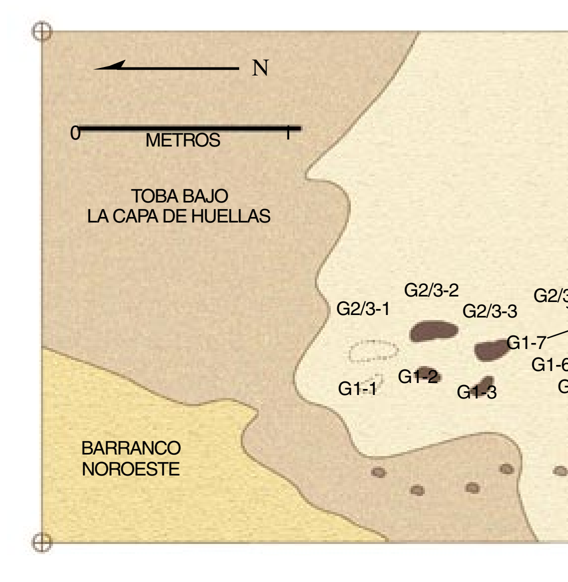
Los restos esqueléticos gozan de mayores posibilidades de preservarse fosilizados que las impresiones en el lodo o las cenizas volcánicas. Abundan, no obstante, repartidos por todo el mundo rastros de animales desde la era Paleozoica, algunos con antigüedad de 500 millones de años. Mientras vive, el animal va dejando muchos rastros; cuando muere, sólo queda el esqueleto. No debe sorprendernos, pues, si nos atenemos a la estadística, que haya impresiones fósiles de algunos rastros. Mas, por su número y variedad, las huellas fósiles en la superficie de Laetoli constituyen un acontecimiento insólito. De los 16 yacimientos de Laetoli en que se han encontrado rastros, se estiman en el mayor unas 18.000 huellas, representantes de 17 familias, en un área de 800 metros cuadrados.

Laetoli está en la rama oriental del Gran Valle del Rift, una zona de actividad tectónica. Hace unos 3,6 millones de años, durante el Plioceno, el volcán Sadiman —situado 20 kilómetros al este de Laetoli— comenzó a escupir nubes de ceniza que se acumularon en capas sobre la sabana circundante. Durante la fase activa del volcán, una serie de erupciones coincidió con el final de una estación seca africana. Tras una lluvia ligera, los animales del contorno dejaron sus rastros en las cenizas mojadas. El material arrojado por el Sadiman era rico en carbonatita, que en cuanto se seca, cementa. Las capas de ceniza se endurecieron y conservaron así miles de huellas de animales que cubrían la región. Poco después, el Sadiman entró de nuevo en erupción y depositó capas adicionales de cenizas que enterraron las huellas y las fosilizaron. Por último, una erosión incesante de millones de años terminó por sacar a la luz la Toba de las Huellas.

La pista con su doble rastro paralelo contiene un total de 54 pisadas, de homínidos sin la menor duda. El suelo iba de escasos centímetros en el extremo norte de la pista —allí donde se descubrieron las primeras huellas— a 27 centímetros en el extremo sur. Al norte, las huellas terminan en el barranco, ancho y profundo, creado por el río Ngarusi; al sur, las fallas y la erosión impiden seguir el rastro. La propia pista está fallada también, con una fosa —una sección que se ha hundido de 20 a 40 cm por actividad tectónica— cerca del punto medio. Parte de la pista ha sufrido el embate de la acción del tiempo: en esta sección la toba se ha transformado en barro seco y las huellas no se han conservado bien. Pero en la zona menos meteorizada el estado de preservación, excelente, permite reconocer el talón, el puente y el dedo gordo, entre otros rasgos anatómicos de tejidos blandos.

Según costumbre inveterada de la paleoantropología, comenzaron pronto las divergencias en la interpretación de las pruebas. ¿A qué especie pertenecían los homínidos que dejaron las huellas? El equipo

3. EL MAPA DE CONTORNO de la huella de homínido G1-36 (*derecha*) se levantó tomando dos fotografías traslapantes de la huella con una cámara de alta resolución. La impresión profunda de la huella indica que el homínido caminaba como un humano moderno, cargando todo su peso sobre el talón. La huella mide unos 20 centímetros de longitud. Dos fotografías de la huella G1-25 muestran que ésta sufrió pocos daños entre su descubrimiento en 1979 y su reexcavación en 1995. La huella reexcavada *(la más a la derecha)* se muestra junto a una fotografía de la huella tomada en 1979 por un miembro del equipo de Mary Leakey.



de Leakey había encontrado huesos fósiles de homínidos en la zona de Laetoli que eran de la misma edad que la pista. En su mayoría, los expertos creen que esos homínidos eran de la especie *Australopithecus afarensis*, que vivió en el este de Africa entre hace 3,0 y 3,9 millones de años. De hecho, uno de los restos de homínidos de Laetoli —mandíbula con nueve dientes *in situ*— se convirtió en el holotipo de *A. afarensis*, es decir, en el fósil que define la especie. (Otro integrante de la misma es la famosa "Lucy", cuyo esqueleto se descubrió en 1974 en Etiopía.) Pero Leakey no aceptó que los homínidos de Laetoli fueran especímenes de *A. afarensis*; se resistía a asignarlos a ninguna especie. (Leakey se mostraba siempre muy cautelosa en la interpretación de los hallazgos.) Sí estaba convencida de que los autores de las pisadas debían incluirse en la línea directa de los antepasados del hombre.

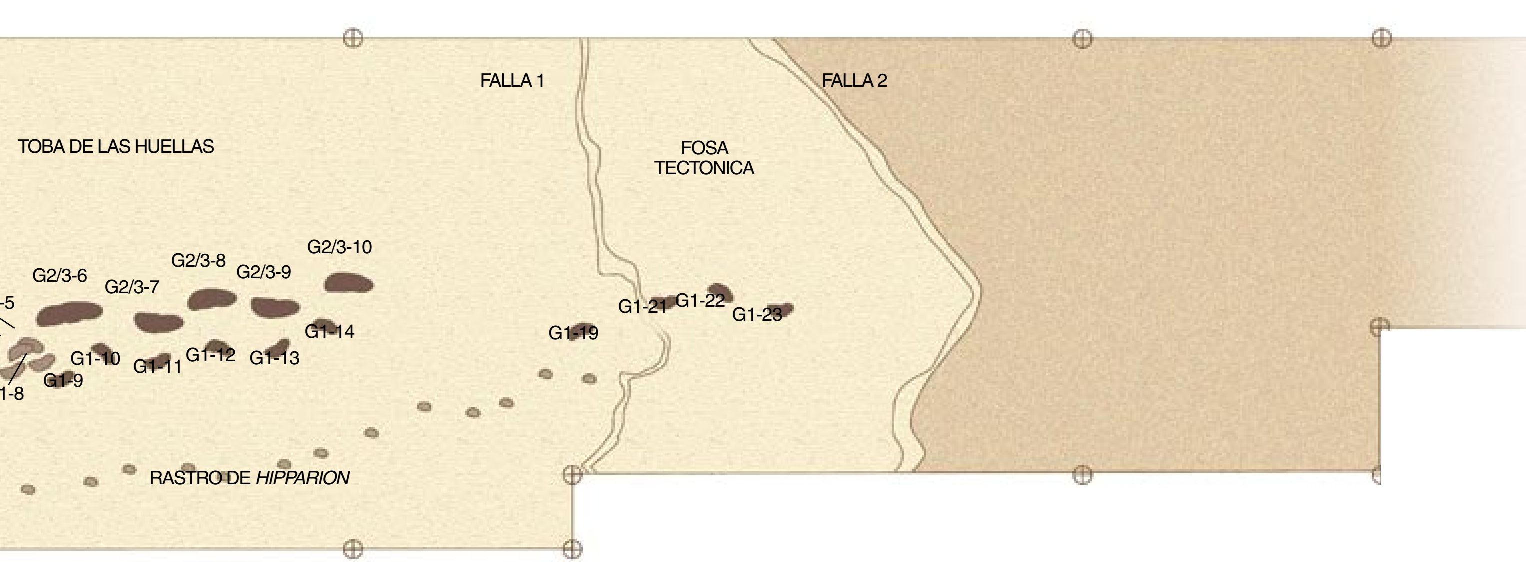
Otro motivo de debate concernía al número de individuos que dejaron los dos rastros paralelos. En un rastro, las pisadas, pequeñas, estaban bien definidas; en el otro, amén de mayores, eran menos nítidas. Para unos expertos, los rastros pertenecían a dos homínidos —posiblemente una hembra y un macho— que caminaban juntos o cerca uno del otro. Para otros, las huellas correspondían a tres individuos. En esta postrera hipótesis, compartida hoy por la mayoría de paleoantropólogos, el rastro de las huellas mayores fue dejado por dos individuos, el segundo de los cuales pisaba intencionadamente sobre las huellas del primero.

Había más cuestiones intrigantes: ¿Hacia dónde se encaminaban los protagonistas? ¿Qué les hizo cambiar el paso —como indica la posición de las cuatro huellas de la sección norte de la pista— como si hubieran mirado hacia atrás, hacia su punto de origen? ¿Formaban un grupo familiar? ¿Transportaban algo? ¿Cómo se comunicaban? Estas apasionantes preguntas nunca tendrán respuesta, pero podemos recurrir a las pruebas ofrecidas por el yacimiento de Laetoli para recrear el momento en que se clavaron las pisadas.

En buena medida, la controversia se desencadenó porque fueron muy pocos los expertos que pudieron estudiar las huellas *in situ*. Al final de cada campaña, el equipo de Leakey volvía a enterrar la pista. Sus componentes, sin embargo, aprovecharon para crear moldes de los rastros mejor conservados y documentar perfectamente el yacimiento. Crearon planos tridimensionales de curvas de nivel de algunas de las huellas fotografiándolas desde dos ángulos, en un proceso de fotogrametría. Más tarde, Leakey publicó su trabajo, firmado







NEVILLE AGNEW y MARTHA DEMAS dirigen el proyecto Laetoli auspiciado por el Instituto Getty para la Conservación. Agnew se doctoró en química por la Universidad sudafricana de Natal en Durban. Dirigió la sección de restauración del museo Queensland en Brisbane, Australia, antes de incorporarse al Getty en 1988. Demas, licenciada en conservación histórica por la Universidad de Cornell, se doctoró en arqueología del Egeo por la de Cincinnati. Se incorporó al Getty en 1990.

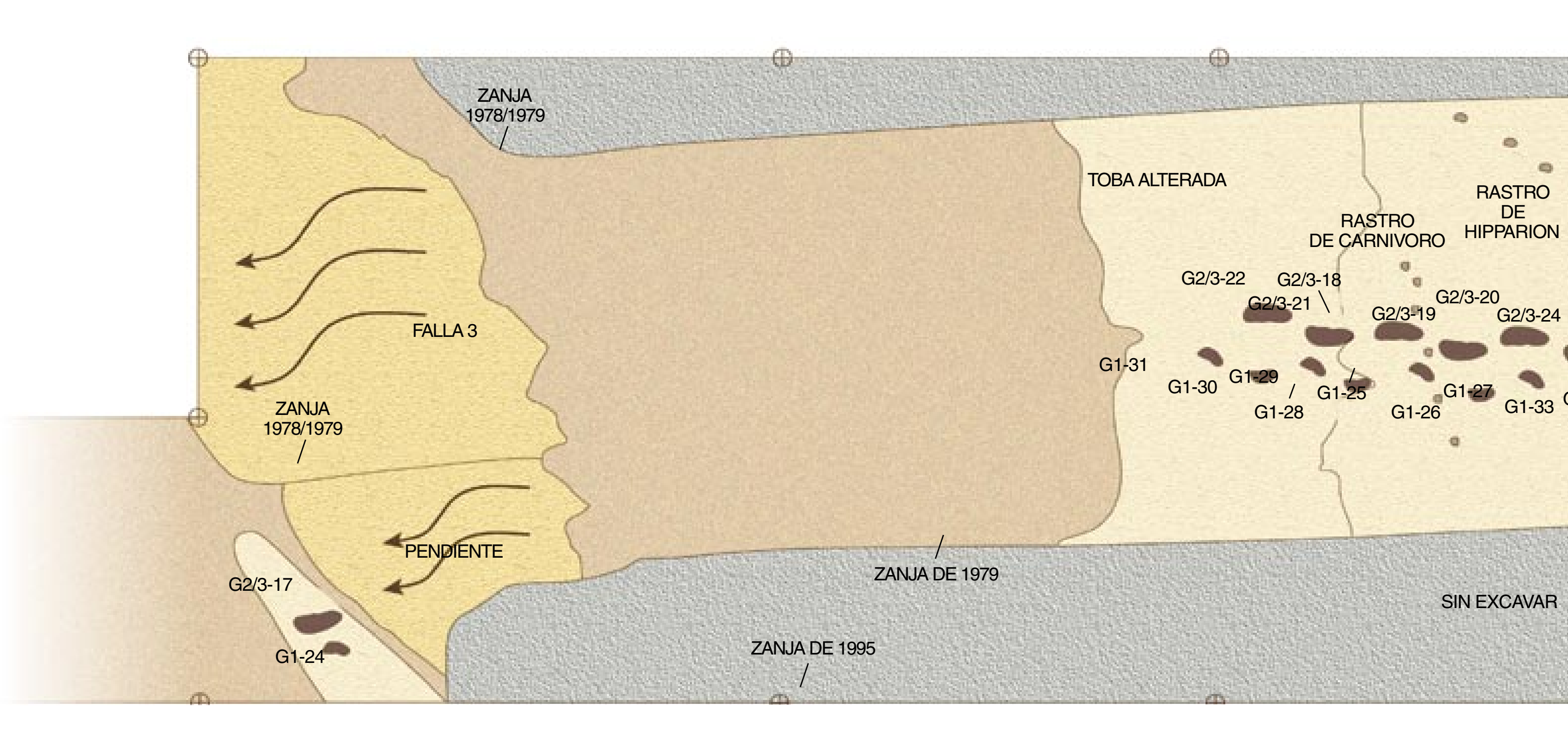
por una legión de colaboradores, en una monografía monumental; allí se abordaban no sólo las huellas de homínidos, sino también los infinitos rastros de animales y la geología de la zona de Laetoli. Las pruebas recopiladas por el grupo de Leakey —que incluían también polen fósil y macrofósiles vegetales— proporcionaron un registro sin igual de la sabana africana reinante en el Plioceno y su contexto para mejor entender la pista de los homínidos.

El trabajo de campo terminó en la campaña de 1979. El equipo de Leakey utilizó arena local de río para enterrar la pista. Como la toba es blanda y se daña fácilmente, recubrieron el montículo de arena con cantos de lava para hacerlo más resistente a la erosión y a los animales errantes por la zona, sobre todo elefantes y el ganado de los masai. Con el material de relleno —nos enteramos después— se introdujeron semillas de *Acacia seyal*, un árbol grande y de crecimiento vigoroso. El relleno suelto más la protección física y retención de la humedad que proporcionaban las piedras crearon un microambiente que condujo a la germinación y a un rápido desarrollo de las plantas. A lo largo de la década siguiente, las acacias y otros árboles crecieron hasta alturas por encima de los dos metros. Quienes acudían ocasionalmente al yacimiento de Laetoli comenzaron a manifestar su preocupación de que las raíces penetraran hasta el nivel de las huellas, con su consiguiente degradación.

En 1992, el Departamento de Antigüedades del gobierno tanzano se dirigió al Instituto Getty, de reconocida experiencia en la preservación de yacimientos arqueológicos, para solicitar consejo sobre el mantenimiento de la integridad de la pista. Al año siguiente, un equipo conjunto del Instituto y el Departamento de Antigüedades excavó una zanja de muestreo en el montículo para comprobar el estado de las huellas de homínidos. La cata reveló que las raíces habían penetrado en algunas pisadas. Pero era excelente el estado en que persistían las zonas donde no habían llegado las raíces. La decisión tomada por Leakey de volver a cubrir el yacimiento había sido correcta. Sin dejar de ponderar su acertada intuición, vistas hoy las cosas, podríamos añadir que quizá se debió ir con más cuidado en la forma de recubrimiento. También el control y mantenimiento permanente —incluida la retirada de las semillas antes de que germinaran— habrían evitado un largo y costoso esfuerzo de conservación.

El Instituto Getty y el gobierno tanzano acordaron colaborar en el proyecto. Pero antes de comenzar con el trabajo de campo hubo que sopesar diversas opciones. Los huesos fósiles se trasladan, casi de oficio, al laboratorio para su estudio y conservación permanente. Dejarlos en el campo sería irresponsable, pues se perderían o estropearían. Pero, ¿se podría levantar la pista entera de los homínidos y trasladarla a un museo de Tanzania? ¿Había posibilidad técnica de ello sin dañar las huellas? Algunos creían que no había otra forma de salvar los rastros.

Pero la remoción hubiera sido harto arriesgada. No se habían ensayado



4. LA PISTA DE HOMINIDOS consta de 54 huellas que discurren hacia el norte en dos rastros paralelos. En el rastro G1 las huellas, pequeñas, están bien definidas. En el rastro G2/3 las huellas, mayores y poco nítidas, revelan que el rastro podría haber sido hecho por dos homínidos que avanzaran en fila india. Los dos rastros más al norte (*a la izquierda, en la página anterior*) se destruyeron por la erosión entre su descubrimiento en 1978 y su reexcavación en 1996. Otras cuatro pisadas de la sección septentrional —G1-6, G1-7, G1-8 y G2/3-5— indican el punto donde se interrumpe la marcha. Se advierten también huellas de un hipparion.

nunca técnicas para cortar, levantar y transportar una pista de semejantes proporciones. La Toba de las Huellas dista de ser un estrato homogéneo. Consta de muchas capas de cenizas volcánicas, cada una con una meteorización, dureza y cohesión diferentes. A menos que se endureciera la toba con resina —una intervención cuyas consecuencias a largo plazo se desconocen— terminaría probablemente por fracturarse durante el proceso de remoción. Más aún, levantar la pista o las huellas por separado las hubiera desligado de los múltiples rastros de animales que se posaron por entonces. Perderíamos buena parte del significado de los rastros de homínidos; vale decir, su situación en el paisaje de sabana de Africa oriental junto con los rastros de otras especies del Plioceno.

En propuesta alternativa se estudió guarecer la pista levantando un cobertizo protector sobre la misma. El yacimiento podría abrirse al público y los estudiosos observar las huellas. Pero Laetoli es un región apartada. Ninguna carretera lleva al yacimiento, ni en las cercanías hay conducciones de agua ni tendido eléctrico. La experiencia en Tanzania ha demostrado que, sin recursos financieros adecuados, personal preparado y una infraestructura idónea, un apantallamiento así de la pista podría resultar desastroso, con la destrucción del yacimiento incluida. En los propios países con recursos abundantes, algunos yacimientos se han degradado por culpa de una mala planificación o porque los recintos de clima controlado no se han comportado según lo esperado. Además, ningún armazón protector podría salvar la pista de la meteorización: estacionalmente, la humedad de las capas inferiores ascendería por capilaridad hasta la superficie. Las sales solubles del agua cristalizarían en la superficie, provocando tensiones que, al cabo del tiempo, romperían la pista. Durante la estación seca, la acumulación de polvo en las huellas requeriría una limpieza frecuente que, inevitablemente, acarrearía daños.

La tercera opción era reexcavar la pista, retirar la vegetación que la había dañado y, luego, enterrar de nuevo el yacimiento, ahora con la precaución de prevenir el crecimiento de raíces. El enterramiento constituye un método de conservación cuya eficacia se ha demostrado. La pista sobrevivió bajo tierra durante miles de milenios; si se la vuelve a enterrar estaría protegida de la erosión, la agresión física y las fluctuaciones bruscas de humedad. Además, el enterramiento es reversible: la toba puede destaparse en el futuro si las otras opciones alternativas se tornan más ventajosas. Por todo ello, el Instituto Getty recomendó enterrar. En 1993 el Departamento de Antigüedades de Tanzania decidió ejecutar el consejo y se creó un comité para subvenir a la realización. En el examen participaron Leakey y otros paleoantropólogos eminentes, funcionarios tanzanos y un representante regional de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

El proyecto de conservación comenzó en 1994. Durante la campaña de ese año se cortaron los árboles y arbustos que crecían sobre el túmulo de enterramiento y a sus alrededores. Para evitar que retoñaran, se aplicó Roundup, un potente herbicida biodegradable, a los tocones. Se mataron 150 árboles y arbustos, 69 de ellos directamente sobre el montículo de enterramiento.

Durante las campañas de 1995 y 1996 se reexcavó la pista. En la sección sur, por donde se empezó, la densidad vegetal formada superaba la del resto. Era allí justamente donde se habían encontrado las huellas mejor conservadas en 1979. Los expertos de distintas disciplinas se sirvieron de las fotografías de Leakey para encontrar la posición exacta de las huellas. También fue útil el molde original de la pista, del que se hizo una réplica, se cortó en secciones suficientemente pequeñas y se usó como guía en las etapas finales de la reexcavación. Para proteger de la luz solar directa la zona excavada y dar sombra a quienes trabajaban en la pista se levantó un cobertizo temporal.

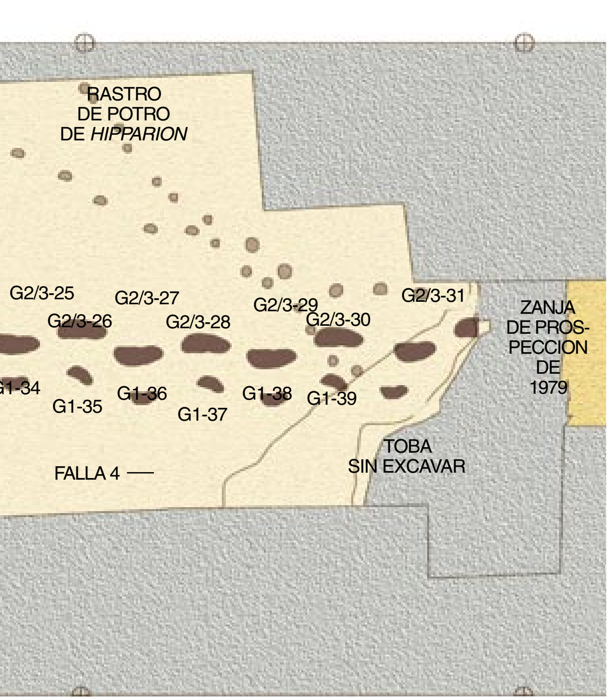
Por suerte, y gracias a la dureza de la toba, los árboles de la sección meridional de la pista habían desarrollado raíces adventicias someras, no raíces pivotantes profundas. En consecuencia el daño era mucho me-

Nueva mirada sobre Laetoli

La interpretación que hace el artista sobre los autores de las pisadas en la figura 1 refleja la hipótesis aceptada según la cual en la pista hay grabada la marcha de tres homínidos. Muchas de las huellas mayores presentan rasgos que abonan la posibilidad de que se trate de pisadas dobles. Las pruebas sugieren que un homínido de cierto porte —en torno al metro y medio, talla que se deduce del tamaño de sus huellas— caminó primero y otro homínido de 1,35 metros de alto pisó deliberadamente sobre las huellas del predecesor, quizá para hacer más fácil el atravesar un suelo cubierto de cenizas. Un homínido menor —en torno a un metro— dejó el rastro paralelo de huellas bien definidas. Este homínido ajustó su marcha para acompasarla con uno o ambos de los otros homínidos.

La ilustración convierte en machos al par de homínidos mayores; al menor, la hace hembra. No fue necesariamente así: el miembro más pequeño del trío pudo haber sido un niño. La hembra se muestra caminando ligeramente detrás del macho guía, ya que los dos no podrían haber procedido a la par sin empujarse.

Los editores



nor de lo que se temía; la mayoría de las huellas permanecían en buen estado. Sin embargo, en zonas de toba meteorizada las raíces habían perforado las huellas. Con destreza quirúrgica se extirparon tocones y raíces, tras consolidar mediante una suspensión acrílica de base acuosa las zonas adyacentes de toba alterada. Se emplearon sierras circulares en miniatura para cortar las raíces y fresadoras para extraer las partes que habían penetrado en la superficie de la pista. Los agujeros dejados por las raíces retiradas se rellenaron con una pasta acrílica y vapor de sílice.

Entre las tareas principales de la conservación destaca la de registrar las condiciones de un yacimiento. Se llevó a cabo una inspección exhaustiva de la pista para recoger los datos básicos que permitan a los investigadores de mañana determinar los cambios. Con una cámara Polaroid los miembros del equipo tomaron fotografías de 20 por 25 centímetros de las huellas. Sobre las fotografías colocaron hojas de acetato y marcaron los lugares donde había fracturas, pérdida de toba y crecimiento de raíces intrusivas o cualquier otra información pertinente.

En el proceso de reexcavación, se observaron manchas oscuras en cada huella de homínido y en su entorno. El oscurecimiento se debía a la aplicación de Bedacryl, un consolidante acrílico que el equipo de Leakey había usado para endurecer las huellas antes de hacer los moldes de las mismas. (Se aplicó silicona a la pista para crear los negativos, que luego se retiró y se empleó para hacer vaciados de fibra de vidrio.) El oscurecimiento era un efecto colateral inesperado: aunque el Bedacryl no dañó las huellas, disminuyó su legibilidad y, por tanto, su valor científico. Emplastando suavemente las huellas con acetona y papel tisú pudo eliminarse el Bedacryl; mas, ante el riesgo de dañar las huellas donde la toba subyacente se mostraba frágil, sólo se limpiaron dos huellas.

Dado que eran muy pocos los investigadores que habían tenido el privilegio de observar las huellas *in situ* —los artículos se fundan en lo inferido a partir de fotos y moldes— el Departamento de Antigüedades tanzano invitó a un grupo selecto a reexaminar la pista mientras se realizaban los trabajos de conservación y registro. Los paleoantropólogos escogidos por la comunidad de expertos fueron Bruce Latimer, del Museo











5. LA REEXCAVACION comenzó en 1995 en la sección meridional de la pista (*arriba derecha*). Los conservadores extrajeron las raíces de acacia que habían penetrado en la Toba de las Huellas (*centro derecha*) y, luego, retiraron el relleno de las huellas (*arriba izquierda*). La pista reexcavada (*abajo izquierda*) fue fotografiada con una cámara Polaroid (*abajo derecha*) para registrar su estado.

de Historia Natural de Cleveland, Craig S. Feibel, de la Universidad de Rutgers, y Peter Schmidt, de la Universidad de Zurich. Elaboraron éstos una descripción formal de las huellas, estatura y marcha de los homínidos, así como un análisis de las capas finas de la Toba de las Huellas.

Limpiadas las pisadas y reparado el daño infligido por las raíces, los fotogrametristas registraron la pista para levantar nuevos mapas de relieve de las huellas. Los nuevos mapas tienen una precisión de medio milímetro, mucho mejor que la de los mapas del equipo de Leakey en 1979. No nos equivocaremos mucho si afirmamos que la pista de Laetoli constituye hoy uno de los yacimientos paleontológicos más minuciosamente documentados. La nueva fotografía, cartografía y examen exhaustivo de las condiciones han añadido un aluvión de datos a la base recopilada durante las campañas de Leakey. El material se está ahora integrando en una base de datos electrónica desarrollada en colaboración con el departamento de geomática de la Universidad de Ciudad del Cabo.

Cuando terminó la fase de conservación y documentación, se enterró de nuevo la pista, bajo múltiples capas de arena y tierra del contorno y de los cercanos ríos Ngarusi y Kakesio. Se cribó la arena para retirar el material grueso y las semillas de acacia. El equipo de conservación derramó arena de grano fino sobre la superficie de las huellas, luego colocó láminas de geotextil —un material de polipropileno permeable al agua— a unos cinco centímetros de la superficie, para que sirviera de hito. Después, esparcieron una capa de arena de grano grueso y la cubrieron con un tipo especial de geotextil llamado Biobarrier, diseñado para impedir la intrusión de las raíces en el relleno.

El geotextil Biobarrier está tachonado de nódulos que liberan poco a poco trifluralina, un herbicida biodegradable de baja toxicidad. Este inhibidor de la raíz no es soluble en agua; por tanto, ni se pierde por lixiviación, ni se dispersa. Biobarrier inhibe el crecimiento radicular, pero no mata a las plantas cuyas raíces entran en contacto con los nódulos. La vida eficaz de Biobarrier depende de la temperatura del suelo y de la profundidad a la que se entierre. Basándonos en los datos del fabricante, el material tendrá una vida eficaz de unos 20 años en el yacimiento de Laetoli. Encima del geotextil se echó otra capa de arena de grano grueso; luego se extendió una segunda capa de Biobarrier y una estera sintética para control de la erosión.





6. EL MOLDE DE LA PISTA hecho por Leakey se empleó para guiar las últimas fases de la excavación de las huellas (*arriba*). Una vez que las pisadas afloraron, se fotografiaron. Los expertos registraron el estado de cada huella, anotando cualquier daño causado por el crecimiento radicular o la erosión (*abajo*).

El equipo de conservación coronó el montículo con una capa de suelo local y otra de bloques de lava para dotar de una armadura física al relleno del enterramiento. Se permitirá que el túmulo, que se eleva un metro en su punto más alto, se cubra de hierbas; sus raíces someras estabilizarán el suelo del enterramiento sin causar ningún daño a la pista. El Departamento de Antigüedades vigilará regularmente el yacimiento y eliminarán todos los vástagos de árboles que echen raíces. Las láminas de geotextil son una segunda barrera de defensa que necesita mantenimiento. La forma del montículo, con pendiente de unos 14 grados a cada lado, facilitará la escorrentía de las aguas superficiales.

El proceso se repitió, fase por fase, en la sección norte de la pista durante la campaña de 1996. Esta sección había sufrido la mayor erosión, ya que las aguas superficiales del área circundante drenan en el río Ngarusi a través del extremo norte de la pista. Este drenaje fue el que expuso la primera huella de homínido encontrada por Abell en 1978; por desgracia, este mismo drenaje ocasionó la pérdida de la huella y otra adyacente en los 18 años transcurridos entre el enterramiento de la pista y su reexcavación. Para evitar que prosiguiera la acción erosiva, se construyeron zanjas con bloques de lava alrededor de la pista que derivaran la escorrentía de las áreas próximas. Se apuntalaron también dos barrancos que amenazaban el extremo norte de la pista: se colocaron en sus laderas bloques de lava y esteras para controlar la erosión.

Cerca de la pista, los miembros del equipo excavaron una zanja de control de 2,5 metros cuadrados. Se enterró más tarde siguiendo el mismo método empleado con la pista. Con cierta periodicidad se volverán a excavar algunos segmentos de esta trinchera para comprobar las condiciones subterráneas y la continuidad de la eficacia del Biobarrier. Se ha permitido el desarrollo de las acacias alrededor de la trinchera de control, para comprobar la eficacia con que Biobarrier impide el crecimiento de las raíces de los árboles. Aunque se espera que los materiales de polipropileno duren muchos años bajo tierra, carecemos de información rigurosa sobre eficacia en zonas tropicales, como Laetoli, donde viven gran cantidad de termitas. Gracias a la trinchera de control, el Departamento de Antigüedades comprobará el funcionamiento de los goetextiles sin pertubar la pista de los homínidos.

Sabemos por experiencia que, si queremos alcanzar una conservación

apropiada, hemos de comprometer en la tarea a los lugareños. Cuando se ven excluidos menudean la degradación negligente y los daños intencionados. Los habitantes de aquella región son, en su mayoría, masai. Estos han mantenido su modo tradicional de vida, que gira en torno a sus rebaños de ganado. El ganado que pastara sobre la pista y en los alrededores aceleraría la erosión del montículo de enterramiento y destruiría el sistema de zanjas y drenajes para desviar la escorrentía superficial. Mientras vigilan el rebaño, los pastores podrían verse tentados a fisgar en el montículo de enterramiento. En la región todos conocen la intensa actividad desarrollada en el yacimiento durante los últimos años y algunos del lugar han dejado entrever su interés por el Biobarrier y otros materiales usados en el enterramiento.

Laetoli se encuentra dentro del Area de Conservación del Ngorongoro, ancha región delimitada por el gobierno para preservar el entorno y la forma de vida del pueblo masai. Esta extraordinaria empresa, quizás única en Africa, tiene posibilidades de éxito bajo una hábil dirección. Acostumbramos pedir opinión al coordinador regional del área —integrado en el comité consultivo del proyecto Laetoli— y a los presidentes de los dos pueblos más próximos, Endulen y Esere. Cuando le planteamos el caso, el *loboini*, curandero y líder religioso de la región, convocó una asamblea en el yacimiento.

A la reunión, que se prolongó un día entero, asistió un centenar de personas, incluyendo hombres y mujeres de todas las edades. El *loboini* destacó el significado de la pista y explicó la necesidad de su protección. Se sacrificó una oveja y se celebró una ceremonia sagrada para incluir el yacimiento entre los lugares venerados por los masai.

Los protagonistas de las huellas: primera imagen

Por Jay H. Matternes

Trabajé en la representación pictórica de los protagonistas de las huellas de Laetoli a comienzos del otoño de 1978, poco después del descubrimiento de la pista. Volé a Africa para entrevistarme con Mary Leakey y sus compañeros en el campamento de la Garganta de Olduvai, en Tanzania. Cuando subí al avión, la única información que tenía sobre el proyecto consistía en unas cuantas fotografías de las huellas y de los contornos, junto con un informe sobre la geología del yacimiento de Laetoli y una lista de los rastros de animales allí encontrados.

Llegado al campamento base, hablé bastante con Leakey e hice algunos esbozos de composiciones propuestas. Leakey me condujo a Laetoli, para que me familiarizara con las principales características del terreno. El análisis de los sedimentos de Laetoli revelaba que hubo allí muchos tipos de precipitaciones de ceniza volcánica; unas quedaron en el suelo sin perturbaciones, otras fueron traídas y llevadas por el viento, pero todas las cenizas procedían del volcán Sadiman. Los geólogos creen que el color de estas cenizas era gris claro, no muy diferente del color de la toba endurecida en la que aparecieron las huellas.

Basé mi reconstrucción de las figuras deambulantes en las descripciones de *Australopithecus afarensis*. Fósiles de esta especie han sido hallados en Laetoli y el triángulo de Afar en Etiopía. Los fragmentos de hueso y muestras dentarias indicaban que ambas poblaciones de homínidos eran aproximadamente iguales y vivieron en el mismo momento en que se grabaron las huellas. Inferí las proporciones de los miembros a partir del esqueleto de “Lucy”, la hembra de *Australopithecus* cuyos restos fósiles habían sido hallados en Etiopía en 1974. Di por supuesto que estos homínidos habían sido bípedos, dotados de energía, magros y capacitados para vivir en ambientes muy dispares. Por eso, habrían desarrollado escasa pilosidad corporal, para asegurar una rápida pérdida de calor. Habrían adquirido también una piel oscura para contrarrestar los efectos perjudiciales de la radiación ultravioleta.

Por las fechas en que trabajaba en los cuadros, habían aparecido muy pocos fragmentos de cráneos de *A. afarensis*. Para los rasgos faciales de la hembra me inspiré en los de *A. africanus*, una especie que había reconstruido con anterioridad. Leakey quería que destacara la baja estatura de estos homínidos, por lo que pinté varias gallinas de guinea cerca de las figuras. El varón lleva un palo para cavar, la única herramienta que conoció (los primeros útiles líticos vendrían mucho después). La hembra porta su pequeño en la cadera, probablemente la postura más conveniente para un bípedo habitual. La teoría de una autoría triple de las pisadas se propuso después de que yo hubiera acabado el cuadro.

El dibujo final (*abajo*) estaba de acuerdo con los pocos hechos que se conocían entonces del yacimiento de Laetoli. El cuadro apareció por primera vez en el número de abril de 1979 de la revista *National Geographic* para ilustrar un artículo de Leakey sobre la pista.

Jay H. Matterness es un artista especializado en dibujos de homínidos y mamíferos fósiles. Su trabajo se ha exhibido en museos de todo el mundo.



LOS MIEMBROS de una familia de homínidos dejan sus huellas en las cenizas del volcán Sadiman.

El diorama de Laetoli

Por Ian Tattersall

Sólo en rarísimas ocasiones el registro fósil aporta pruebas de un acontecimiento decisivo de la prehistoria humana. Por eso, cuando, a finales de los ochenta, buscábamos temas para presentar en forma de diorama en la Sala de Biología y Evolución Humanas del Museo Americano de Historia Natural, la evocación de las huellas de Laetoli no tenía rival. Construir esculturas realistas de humanos fósiles implica muchas decisiones delicadas. En el caso de Laetoli, las decisiones resultaban harto difíciles, porque los homínidos de hace 3,6 millones de años están muy alejados de los humanos modernos. Nuestro diorama de Laetoli presentaba un problema adicional: estaba diseñado para representar un hecho específico —el viaje de los homínidos a través de una llanura de lava volcánica—, pero los datos de semejante episodio son un tanto ambiguos.

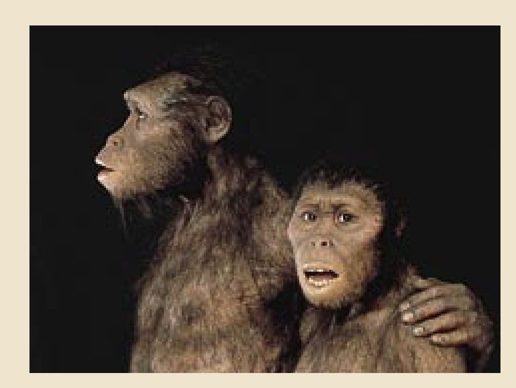
Con Willard Whitson, diseñador de la exposición, me trasladé al yacimiento de Laetoli. Analizamos nuestro proyecto de diorama con Peter Jones, arqueólogo del equipo de Mary Leakey cuando se descubrió la pista en 1978. También consultamos a Ron Clarke, que excavó bastantes pisadas. Nadie pone en cuestión que los dos rastros paralelos fueron hechos por seres que caminaban erguidos (aunque también podrían haber sido capaces de trepar a los árboles). Las huellas del rastro occidental eran mucho menores y más nítidas que las impresiones del rastro oriental, pero Jones señaló que la longitud del paso era la misma. Estaba claro que los homínidos andaban al mismo paso, acomodando la zancada a la del otro, señal de que los dos rastros se grabaron a la vez. Más aún, los rastros están tan juntos, que los homínidos debieron de tener algún tipo de contacto físico mientras los producían.

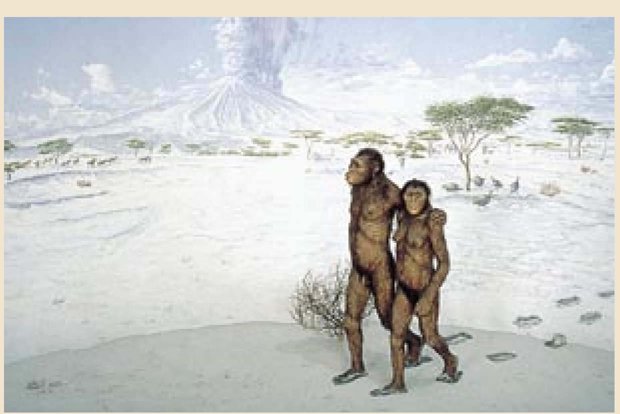
Algunos antropólogos resolvieron que las trazas correspondían a tres homínidos. El rastro occidental, afirman, pertenecía a un individuo pequeño, mientras que el rastro oriental lo dejaron dos homínidos mayores que caminaban en fila india, con un individuo que hollaba deliberadamente sobre la pisada del otro. Pero Clarke no estaba de acuerdo con esta explicación. Afirmaba que, dado que las huellas del rastro oriental tienen características tan consistentes, deben haber sido producidas por un único homínido grande. Las huellas mayores estaban menos definidas que las pequeñas, argumentaba Clarke, porque los pies del homínido grande se habrían deslizado más en la ceniza enfangada por la lluvia.

Estos hechos e hipótesis constituían nuestro punto de partida. Todo lo demás sería pura conjetura. El que fueran individuos de tamaño diferente podía significar varias cosas: macho y hembra, progenitor y cría, hermanos mayor y menor. Y aunque sospechábamos que los dos homínidos mantenían algún tipo de contacto físico, no teníamos idea de cómo se apoyaban el uno en el otro. ¿Iban cogidos de la mano? ¿Andaban tomados del brazo? ¿Transportaban algo entre ellos?

La escena, tal como la resolvimos al final (*arriba*), muestra dos *Australopithecus afarensis*, un macho grande y una hembra menor, caminando juntos a través de un paisaje de vegetación dispersa. Optamos por un macho y una hembra para conferir a la escena mayor representatividad y, también, para mostrar la notable diferencia de talla entre los sexos que se cree existía en *Australopithecus afarensis*, el supuesto autor de la pista. El brazo del macho rodea los hombros de la hembra.

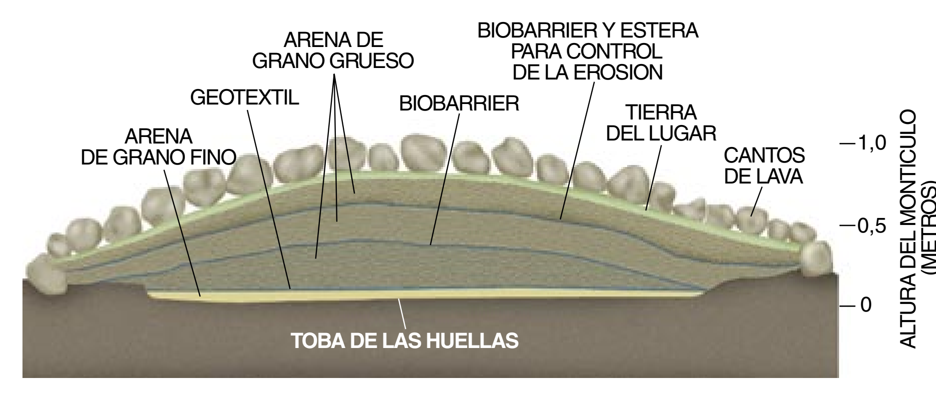
Una mirada a los rostros de estos personajes, brillantemente esculpidos por John Holmes, muestra que ambos, macho y hembra, están preocupados. Observamos dos individuos pequeños, lentos y bastante indefensos, moviéndose a través de un campo abierto que con casi toda seguridad estaba plagado de predadores. Estos homínidos primitivos eran bípedos cuando estaban en la sabana africana, pero este ambiente peligroso y difícil no era, probablemente, su entorno preferido. Quizás andaban cruzando ese territorio hostil de camino hacia otra zona más placentera. Sus rastros se dirigen casi directamente hacia la bien irrigada cuenca de Olduvai, donde los bosques de las orillas del lago y sus bordes les harían sentirse en casa.





LAS ESCULTURAS realistas de los homínidos de Laetoli tienen expresiones de preocupación (*arriba*). El fondo del diorama muestra el austero paisaje (*abajo*).

Ian Tattersall es conservador del departamento de antropología del Museo Americano de Historia Natural, en Nueva York.



7. EL MONTICULO de reenterramiento sobre la pista de los homínidos consta de cinco capas de arena y tierra (*diagrama*). El equipo de conservación derramó arena fina sobre la Toba de las Huellas (*fotografía superior*). Las capas de enterramiento están separadas por geotextiles de polipropileno y esteras para frenar la erosión (*centro*). El túmulo está coronado con bloques de lava para proteger la pista del ganado y otros animales (*abajo*).







En 1996, tras haber reexcavado la sección norte de la pista, se repitió la ceremonia. La propia Leakey asistió a la asamblea y recibió los saludos de algunas de las personas más ancianas que recordaban cuando trabajaba en la zona de Laetoli en los años setenta.

A la larga, la supervivencia del yacimiento dependerá de la vigilancia de las autoridades tanzanas y la comunidad internacional. El Departamento de Antigüedades ha nombrado guardas permanentes a dos masai de la zona y ha instituido un plan detallado de seguimiento y mantenimiento. En razón del mismo se realizarán fotografías periódicas del yacimiento desde perspectivas específicas, se eliminarán los brotes —especialmente de acacias— y se repararán zanjas y sistema de drenaje.

Como el yacimiento de Laetoli no está abierto a los visitantes, hemos instalado una muestra permanente en el Museo Olduvai, que domina la garganta donde Leakey y su esposo, Louis S. B. Leakey, cosecharon tantos éxitos. El museo se halla a corta distancia de la polvorienta carretera que va del cráter del Ngorongoro a la llanura del Serengeti; es accesible tanto para las personas de la zona como para los visitantes internacionales. La sala dedicada a Laetoli contiene el molde de la sección sur de la pista, junto con textos y fotografías que explican por qué se reenterró el yacimiento y de qué forma está protegido. En el pasado, en el Museo Olduvai recalaban apenas los turistas de camino hacia la llanura del Serengeti. Pero el texto de la exposición de Laetoli está en swahili, no sólo en inglés; se espera con ello que la población local —en particular escolares tanzanos— visiten el museo para aprender más sobre las huellas de Laetoli y se sientan motivados para cuidar el yacimiento.

Las huellas encierran una fuerza evocadora. Cuando Neil Armstrong caminó sobre la superficie de la Luna, las imágenes de las huellas de sus suelas de astronauta se convirtieron en símbolo de los primeros pasos de la humanidad por el cosmos. Entre las huellas de Laetoli y las de la Luna discurre una evolución de 3,6 millones de años. Mirando los miles de rastros animales que hay en Laetoli da la sensación de que los homínidos apenas frecuentaban ese paisaje, tal es la escasez de sus huellas si las comparamos con las del resto de la fauna. Debieron de haber pertenecido a una especie insignificante que escapó a la inevitable extinción en aquel ambiente hostil. El rastro melancólico de tres figuras chaparras haciendo su camino a través de las cenizas recién caídas del Sadiman es humilde y conmovedor. Estas frágiles trazas de los comienzos de la humanidad en las llanuras de Africa merecen todo el cuidado y protección para su supervivencia futura.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LAS PISADAS FÓSILES DE LAETOLI. Richard L. Hay y Mary D. Leakey en *Investigación y Ciencia*, n.º 67, págs. 16-25; abril, 1982.

DISCLOSING THE PAST. Mary D. Leakey. Doubleday, 1984.

HOMINID FOOTPRINTS AT LAETOLI: FACTS AND INTERPRETATIONS. Tim D. White y Gen Suwa en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 72, n.º 4, págs. 485-514; 1987.

LAETOLI: A PLIOCENE SITE IN NORTHERN TANZANIA. Dirigido por M. D. Leakey y J. M. Harris. Clarendon Press, 1987.

MISSING LINKS: THE HUNT FOR EARLIEST MAN. John Reader. Penguin Books, 1988.

Efectos de la ingravidez sobre el cuerpo humano

Ronald J. White



Los efectos del viaje espacial sobre el organismo semejan achaques propios del envejecimiento. Del estudio del comportamiento de los astronautas sale beneficiada la asistencia médica en órbita y en tierra firme

Cuando Valery Polyakov saltó de su cápsula *Soyuz* el 22 de marzo de 1995, tras superar un récord mundial de 438 días de permanencia en la estación Mir, demostraba, con su salud esplendorosa, que los seres humanos podían vivir y trabajar en el espacio durante meses. Pero no siempre estuvo claro que eso fuera cierto.

En 1951, más de 10 años antes del primer vuelo corto de Yuri Gagarin (108 minutos), *Scientific American* publicó un artículo de Heinz Haber, de la Escuela de Medicina de Vuelo del Ejército del Aire, en el que se especulaba con los efectos médicos de los viajes espaciales y, en particular, con la ingravidez. Algunas de sus predicciones, así la aparición de mareos en el despegue, se han confirmado. Pero no otras; por ejemplo, la idea de que los tripulantes se sentirían cual si se movieran a trompicones hacia delante y hacia atrás o que, de repente, empezarían a girar durante el vuelo normal en el espacio.

Resulta muy difícil predecir qué va a suceder cuando nuestro cuerpo se enfrenta a un reto inédito; lo pueden confirmar muchos médicos. Una y otra vez, los viajes espaciales han revelado la maravillosa y, a veces, sutil capacidad de adaptación del organismo. Pero sólo en los últimos años, a medida que han ido aumentando la cantidad y la calidad de los datos (la experiencia acumulada de casi 700 personas que han pasado un total de 58 persona-años en el espacio), se han empezado a conocer las respuestas del organismo ante la ausencia de gravedad. Con ello mejora la atención sanitaria; y no sólo la de los astronautas; también la nuestra. Sin preverlo, la medicina espacial nos ha traído una mayor profundización en el conocimiento de la actuación del cuerpo humano en la Tierra.

Muchos factores afectan a la salud durante el vuelo espacial. Ninguno tan absorbente y crucial como la ingravidez. Los efectos directos e indirectos de la falta de gravedad desencadenan una cascada de respuestas interrelacionadas que se inician en tres tipos diferentes de tejidos: los receptores de gravedad, los líquidos y las estructuras que soportan el peso. En última instancia, reacciona todo el organismo, desde los huesos hasta el cerebro.

Según los propios cosmonautas, cuando se agarran a la pared de la nave y tiran y empujan con el cuerpo hacia atrás y hacia delante experimentan la sensación de permanecer quietos mientras se mueve el vehículo. El motivo de esa impresión radica en nuestra dependencia de la gravedad para la información perceptiva.

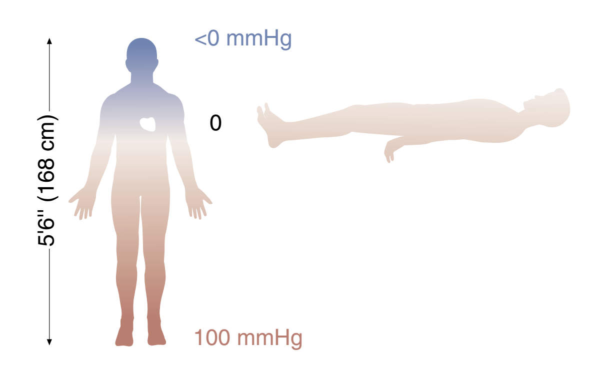
1. LA AUSENCIA DE PESO comporta efectos secundarios; entre otros, mareo, congestión de la cabeza y pérdida ósea. Durante su paseo espacial, en 1984, Bruce McCandless II probó el nuevo lanzacohetes de la NASA (y se convirtió en el primero que se aventuró a salir de la cápsula espacial sin cable de anclaje).

Por su naturaleza continua y omnipresente, la gravedad se desvanece de nuestra consciencia diaria. Mas, aunque su mano invisible se nos hace a veces patente en unas venas varicosas o el mareo que nos sobreviene al erguirnos, nunca la olvida nuestro cuerpo. Seamos conscientes o no de ella, hemos desarrollado muchísimas reacciones silenciosas, automáticas, para afrontar la tensión constante de vivir en un mundo que nos atrae hacia abajo. Sólo cuando reducimos o aumentamos la fuerza eficaz de la gravedad ejercida sobre nuestros organismos, la percibimos conscientemente. Si no se trata de eso, nuestra percepción es indirecta.

Los sentidos ofrecen información precisa sobre la ubicación de nuestro centro de masas y sobre las posiciones relativas de las partes de nuestro organismo. Gracias a ello podemos integrar las señales procedentes de ojos y oídos con la información proveniente de órganos vestibulares del oído interno, de los músculos y articulaciones, de nuestros sentidos del tacto y la presión. Muchas de esas señales dependen del tamaño y del sentido de la fuerza gravitatoria terrestre constante.

El aparato vestibular del oído interno consta de dos componentes: los canales semicirculares (tres tubos perpendiculares entre sí y llenos de líquido que contienen células pilosas conectadas con fibras nerviosas) y los otolitos (dos sacos llenos de cristales de carbonato cálcico embebidos en un gel). Los canales son sensibles a la aceleración angular de la cabeza; los otolitos responden a la aceleración lineal. Puesto que el movimiento de los cristales en los otolitos genera la señal de la aceleración hacia el cerebro, y dado que las leyes de la física relacionan esa aceleración con una fuerza neta, la gravedad se halla siempre implícita en la señal. De ahí que se haya atribuido a los otolitos el papel de receptores de la gravedad. No son los únicos. Los receptores mecánicos presentes en los músculos, los tendones y las articulaciones —amén de los receptores cutáneos de presión, en particular, los situados en la planta de los pies— responden al peso de los segmentos de las extremidades y de otras partes del organismo.

La eliminación de la gravedad transforma esas señales. Los otolitos dejan de percibir una inclinación descendente con los movimientos de la cabeza. Las extremidades ya no pesan, ni, por tanto, se exige de los músculos que, según lo acostumbrado, se contraigan y relajen para mantener la postura e inducir movimiento. Los receptores del tacto y la presión situados en los pies y los tobillos ya no señalan la dirección descendente. Estos cambios y otros contribuyen a la aparición de ilusiones de orientación visual y sentimientos de autoinversión, como el sentir que el organismo o la nave se reorientan de forma espontánea. En 1961, el cosmonauta Gherman Titov contó haber experimentado sensaciones intensas de hallarse en posición invertida al poco de empezar un vuelo de sólo un día. El año pasado, Byron K. Lichtenberg comentaba así sus primeras experien-



2. LA PRESION HIDROSTATICA de los vasos sanguíneos cambia drásticamente al erguirnos. La presión aumenta con la profundidad por debajo del corazón, hasta 100 milímetros de mercurio (mmHg) en una persona de talla media; por encima del corazón, la presión disminuye. A resultas de eso, el fluido se deposita en la parte inferior del organismo y el flujo sanguíneo disminuye. A la inversa, en una posición de decúbito prono (o en ingravidez), la presión se iguala y el líquido se derrama en la parte superior del organismo.

cias de vuelo: “Cuando los motores centrales se detuvieron, sentí como si hubiéramos dado un vuelco de 180 grados.” Esas ilusiones pueden repetirse incluso después de cierto tiempo en el espacio.

La ausencia de otras claves sensoriales cruciales provoca confusión en el cerebro. Aunque el vuelo orbital es una caída libre permanente (se distingue del paracaidismo acrobático sólo en que la velocidad de avance coloca la nave alrededor de la curva del planeta), los astronautas dicen no tener la sensación de estar cayendo. Es probable que la percepción de caída dependa de indicios visuales y de pistas sobre el flujo del aire, además de la información directa procedente de los receptores de la gravedad. Hipótesis que contradice lo postulado por Haber y su colega Otto H. Gauer en 1950: “En ausencia de gravedad ha de producirse necesariamente una sensación de caída en el espacio libre. Se supone que uno llegaría a acostumbrarse poco a poco a ese estado.”

La suma de cambios semióticos provoca, en la mitad por lo menos de los cosmonautas, un mareo cuya sintomatología nos es familiar aquí abajo: cefalea, concentración alterada, pérdida de apetito, desazón en el estómago y vómitos. El mareo espacial no suele durar más allá de los tres primeros días de ingravidez, pero los cosmonautas cuentan que les sucede algo similar al final de vuelos largos.

Al principio, el mareo se atribuyó a la pauta insólita de actividad vestibular, que entraba en conflicto con lo esperado por el cerebro. Una explicación, lo sabemos ahora, harto simplista. El malestar resulta de la convergencia de varios factores, entre ellos la alteración de las pautas y niveles de actividad motora, necesarios para controlar la propia cabeza. Podemos provocar un mareo similar con sistemas informáticos diseñados para crear ambientes virtuales, a través de los cuales se puede navegar prescindiendo de las fuerzas y pautas sensoriales que rigen durante el movimiento real.

Con el paso del tiempo, el cerebro se adapta a las nuevas señales. Para algunos cosmonautas “abajo” se convierte en el mero lugar donde están los pies. Es probable que la adaptación obligue a cambios fisiológicos en los receptores y en las pautas de comportamiento de las neuronas. Atravesamos cambios similares aquí en la Tierra durante el crecimiento y la maduración, así como en los períodos de grandes cambios en la razón peso-talla. No acaba de entenderse bien el mecanismo fisiológico mediante el cual controlamos el equilibrio y evitamos caernos. Dado que las personas, por lo demás sanas, que vuelven del espacio tienen al principio dificultad para mantener el equilibrio, pero recuperan este sentido con rapidez, la investigación sobre el comportamiento subsiguiente al vuelo podría permitir auxiliar a quienes, sin ser cosmonautas, sufren también pérdida del equilibrio.

Es lo que hicieron Bernard Cohen, de la Facultad de Medicina de Monte Sinaí, y Gilles Clément, del Centro Nacional de Investigación Científica de París. Acometieron ese trabajo tras la misión del transbordador *Neurolab*, terminada el 3 de mayo. Para vincular dicha línea de investigación con pacientes que sufren trastornos del equilibrio, Barry W. Peterson, de la Universidad del Noroeste, y un equipo subvencionado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio y el Instituto Nacional de la Salud, están preparando el primer modelo informático de cuerpo entero correspondiente a la postura humana y el control del equilibrio.

El segundo grupo de efectos ejercidos por la ingravidez tiene que ver con los líquidos corporales. A los pocos minutos de llegar a un entorno sin gravedad, empiezan a hincharse las venas del cuello; la cara se infla y adquiere redondez. Conforme el fluido progresa hacia el tórax y la cabeza, se congestionan la nariz y los senos. Esta obstrucción, similar a un resfriado común, persiste durante todo el vuelo, salvo en los momentos de ejercicio intenso, tiempo en que el cambio de presión de los líquidos del organismo alivia transitoriamente la congestión. Se alteran incluso los sentidos del gusto y el olfato; la comida con especias apetece más. En los primeros días de la astronáutica, los médicos temían que la congestión torácica constituyera un peligro, el que corren los enfermos del corazón con el edema pulmonar. Por fortuna, no ha resultado ser así.

Todos esos episodios tienen un mismo origen: los líquidos del organismo han dejado de pesar. En promedio, el 60 por ciento del peso de un sujeto es agua, repartida por las células del organismo (líquido intracelular), las arterias y las venas (plasma sanguíneo) y los espacios entre los vasos sanguíneos y las células (líquido intersticial). Aquí en la Tierra, cuando una persona se pone en pie, el peso del agua ejerce una fuerza en el organismo. En el sistema vascular, donde existe comunicación directa entre las columnas de líquido, la presión arterial aumenta hidrostáticamente; con un comportamiento parejo, en el agua aumenta la presión con la profundidad. Si el sujeto permanece inmóvil de pie, el efecto hidrostático puede ser importante. En los pies, la presión arterial y la venosa pueden aumentar unos 100 milímetros de mercurio (el doble de la presión arterial normal y un múltiplo notable de la presión venosa normal). Por encima de los pies, aunque por debajo del corazón, la presión aumenta de cero a 100 milímetros de mercurio. Por encima del corazón, la presión arterial y la venosa caen por debajo de la presión atmosférica.

El efecto hidrostático tiene una influencia pequeña sobre la sangre que atraviesa los tejidos, porque las presiones arterial y venosa aumentan en la misma proporción. Sí afecta a la distribución de los líquidos en el

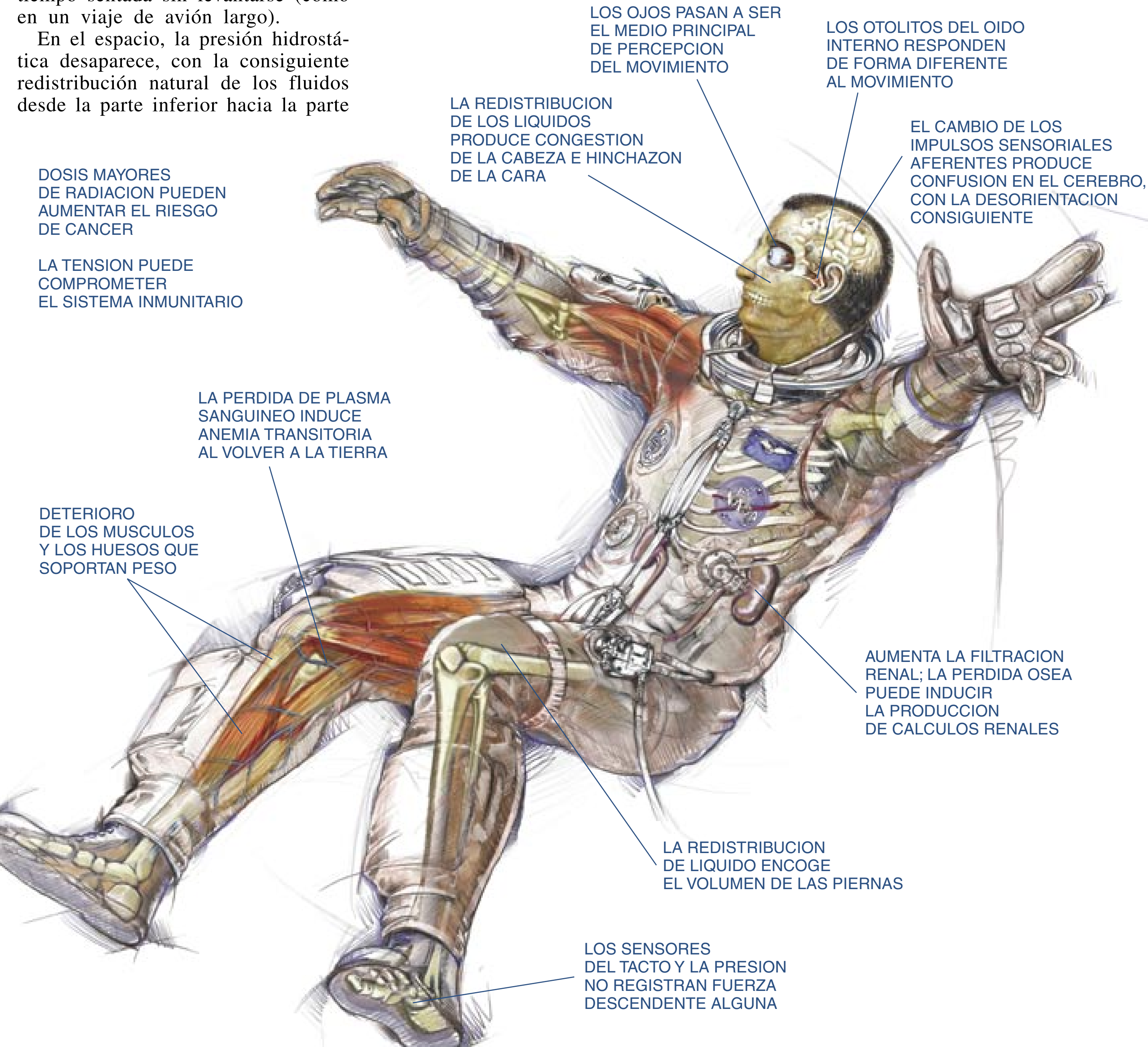
JOHN H. WHITE es director adjunto del Instituto Nacional de Investigación Biomédica Espacial, adscrito a la Facultad de Medicina Baylor de Houston.

interior del organismo al aumentar la cantidad de sangre que pasa de los capilares al espacio intersticial. El tránsito de una posición en decúbito prono a otra en bipedestación desplaza el líquido hasta la parte inferior del cuerpo y reduce el flujo sanguíneo de retorno al corazón. Mantenerse de pie sin moverse durante mucho tiempo puede inducir un síncope; no otra cosa les ocurre a los soldados que se desmayan en formación. Efectos hidrostáticos son también la aparición de venas varicosas y la hinchazón de los pies; la deformación permanente en el primer caso obedece a la afluencia de líquido extra, en tanto que la hinchazón de los tobillos suele darse cuando la persona ha estado mucho tiempo sentada sin levantarse (como en un viaje de avión largo).

En el espacio, la presión hidrostática desaparece, con la consiguiente redistribución natural de los fluidos desde la parte inferior hacia la parte superior del organismo. A tenor de los resultados obtenidos en la medición directa del volumen de las piernas, cada una pierde alrededor de un litro de líquido (una décima parte de su volumen) el primer día. Las piernas se empequeñecen, pues, mientras se está en el espacio. (Para ser exactos, los líquidos inician su camino hacia la cabeza cuando los astronautas se hallan todavía en la rampa de lanzamiento, pues pasan horas sentados en sofás con los pies por encima de la cabeza.) A medida que el líquido se va redistribuyendo, el cuerpo del astronauta se va adaptando con el ulterior reparto de agua entre sus compartimientos. Así, el volumen plasmático registra una caída brusca (del 20 por ciento) y se mantiene bajo.

Estos cambios en los fluidos corporales desatan, a su vez, una cascada de mecanismos de interacción renal, hormonal y mecánica que regulan los niveles hidroelectrolíticos. Por ejemplo, la filtración renal, normalmente estable, aumenta en casi un 20 por ciento, nivel en que persiste a lo largo de la primera semana transcurrida en el espacio. De regreso a

Efectos del viaje espacial sobre el organismo





3. EL ESTAR TUMBADO remeda a la ingravidez en lo concerniente a los efectos que ejerce sobre el organismo. En el Centro de Investigación Ames de la NASA, los voluntarios se tumban cabeza abajo según un ángulo de seis grados (que no es lo confortable que podría parecer cuando se prolonga durante semanas). Los líquidos se deslizan desde las extremidades inferiores hacia la parte superior del organismo, los músculos se atrofian y los huesos se debilitan. Los voluntarios han de someterse a diversos tipos de ejercicio, dietas y fármacos de recuperación. A la derecha, sentado, aparece Charles Brady, astronauta encargado de las pruebas médicas durante la misión del Laboratorio Espacial de 1996.

Tierra, los cosmonautas muestran una forma especial de anemia, aun cuando el vuelo durase pocos días. En los últimos años, Clarence Alfrey, de la Facultad Baylor de Medicina, ha demostrado que la pérdida de plasma y la reducción concomitante de espacio vascular induce una sobreabundancia de eritrocitos. Ante esas alteraciones, el organismo suspende la producción de nuevos eritrocitos y los destruye (mediante un mecanismo que los hematólogos no habían apreciado bien antes de la investigación que hizo Alfrey en los astronautas).

Vayamos con el tercer grupo de efectos causados por la ingravidez. Se trata de los que guardan relación con el músculo y el hueso. Los astronautas retornan con merma en ambos tejidos. ¿Debe ello preocuparnos?

En ingravidez, experimentan un cambio drástico las fuerzas que operan en el interior de los elementos estructurales del organismo. Liberada de su opresión la columna, aumenta la talla de las personas (unos cinco centímetros). Pulmones, corazón y demás órganos encerrados en el tórax carecen de peso; en consecuencia, la caja torácica se relaja y expande. De igual forma, se desvanece el peso del hígado, bazo, riñones, estómago e intestinos. “Sientes —describía F. Andrew Gaffney después del vuelo que realizó en 1991— que te flota el intestino. De repente, me encontré apretándome el abdomen, como si quisiera volver a colocar las cosas en su sitio.”

Entre tanto, músculos y huesos empiezan a utilizarse de forma diferente. El músculo esquelético, el mayor de los tejidos orgánicos, se adquirió para sostener nuestra postura erguida y para mover distintas partes del cuerpo. Ahora bien, en el espacio los músculos no han de cumplir la función asignada en Tierra, a saber, servir de apoyo antigravitatorio. Además, los músculos requeridos para moverse en torno a una cápsula no son los mismos que los que intervienen en el descenso suave de una colina. Algunos músculos se atrofian muy deprisa. Al mismo tiempo, se altera la naturaleza del propio músculo; ciertas fibras de contracción lenta, útiles en la fuerza contra la gravedad, se sustituyen por fibras de contracción más rápida, adecuadas en una respuesta pronta. Ninguno de esos cambios representa un problema para los astronautas, siempre que realicen sólo trabajos livianos. Hoy la experimentación insiste en descubrir cómo evitar la atrofia de los músculos necesarios para realizar trabajos onerosos durante los paseos espaciales y en mantener los músculos para un regreso seguro a la Tierra.

Sufre también cambios profundos el metabolismo óseo. El hueso, uno de los materiales biológicos más fuertes que se conocen, constituye un tejido dinámico. Compete a los osteoblastos su fabricación; de su destrucción se encargan los osteoclastos. Ambos tipos de células suelen trabajar en armonía para la reconstitución permanente de los huesos a lo largo de la vida. Estos sistemas celulares son sensibles a hormonas y vitaminas transportadas por la sangre; también responden a la tensión mecánica ejercida sobre el hueso.

Consta el hueso de materiales orgánicos, que le dan fuerza y estabilidad, y materiales inorgánicos, que le aportan rigidez y lo convierten en depósito de minerales. Por botón de muestra, el 99 por ciento del calcio presente en el organismo se encuentra en el esqueleto. La función normal de todos los tipos de células demanda niveles estables de calcio en los fluidos corporales.

En estudios conjuntos realizados por rusos y norteamericanos ha quedado demostrado que los cosmonautas pierden masa ósea de las vértebras inferiores, las caderas y la parte superior del fémur; lo hacen a una tasa en torno al 1 por ciento al mes, durante el período entero de la misión. Hay zonas que, como el talón, pierden hueso con mayor celeridad que otras. Disminuye también la formación de hueso, según ha revelado la investigación con animales transportados a bordo.

Huelga decir que el fenómeno causa preocupación. Durante los vuelos espaciales, la pérdida de hueso eleva los niveles de calcio del organismo, lo que puede producir cálculos renales y calcificación de los tejidos blandos. Al volver a la Tierra, la pérdida de calcio óseo se interrumpe en cuestión de un mes, pero se ignora si el hueso se recupera del todo. Son muy pocas las personas que han permanecido mucho tiempo en el espacio. Quizás algo de esa pérdida sea irreversible, en cuyo caso los astronautas se mostrarán más proclives a las fracturas. La misión de 1996 encomendada al *Laboratorio Espacial* se reservó en parte a esos temas. Un equipo integrado por expertos italianos, suecos, suizos y estadounidenses ejecutó ocho proyectos relacionados con las transformaciones que sufrían músculo y hueso.

Tales limitaciones de la ciencia médica espacial no hacen más que



4. EJERCICIOS DUROS y de varias horas son los que deben realizar los astronautas. Aquí los ejecutaba Terence T. Henricks en la lanzadera *Atlantis* en 1991, mientras que Mario Runco, Jr., conectado a los sensores médicos, esperaba su turno. Aunque la práctica de ejercicio quizá retrase la atrofia de los músculos, su eficacia no está clara todavía.



5. JOHN GLENN, astronauta convertido en senador para volver de nuevo al espacio. La foto, de 1989, recoge el momento en que baja de un doble de la lanzadera. Entre las funciones con el *Discovery* revisten particular interés los efectos médicos del viaje espacial similares a los síntomas del envejecimiento, como la mala calidad del sueño.

reflejar lo mucho que ignoramos a propósito del funcionamiento de nuestro organismo en Tierra. Está harto comprobado que, tras la menopausia, las mujeres son propensas a la osteoporosis. Se sabe que en esta pérdida de masa ósea pueden hallarse implicados factores diversos (actividad, nutrición, vitaminas, hormonas), pero se desconocen los mecanismos de acción de tales factores y su mutua interrelación. Ante esa complejidad no es fácil hilvanar una respuesta apropiada. Lo que significa que, por lo que concierne a la pérdida ósea en el espacio, carecemos todavía de prescripción correcta. Con los diversos tipos de ejercicios ensayados hasta ahora no se ha cosechado ningún éxito notable.

Pero las consecuencias de la ingravidez no se reducen a la desorientación, la redistribución de líquidos y la pérdida de músculo y hueso. Otros sistemas se ven también afectados de una manera directa e indirecta. Por ejemplo, el pulmón.

El equipo de John B. West, de la Universidad de California en San Diego, junto con Manuel Paiva, de la Universidad Libre de Bruselas, han estudiado el comportamiento del pulmón en el espacio. Han aprendido muchas cosas que no hubieran descubierto en un laboratorio terrestre. Aquí abajo, la región superior del pulmón tiene un modelo de flujo aéreo y sanguíneo distinto de la región inferior. Se ignoraba si las diferencias entre tales patrones obedecían a la gravedad o resultaban de la naturaleza del propio pulmón. La investigación espacial acaba de proporcionar pruebas inequívocas de lo último: incluso en ausencia de gravedad, las distintas partes del pulmón tienen niveles diferentes de flujo aéreo y sanguíneo.

No todo lo que afecta al organismo durante el vuelo espacial guarda relación exclusiva con la ingravidez. Se resienten, asimismo, el sistema inmunitario (las tensiones físicas y psicológicas del vuelo espacial inciden, a buen seguro, en la inmunodeficiencia experimentada por los astronautas) y los múltiples sistemas responsables de la cantidad y la calidad del sueño (los niveles de iluminación y los programas de trabajo alteran los ritmos normales del organismo). Mirar por la ventana de la nave antes de retirarse (una tentación difícil de resistir, considerando la vista) puede permitir el paso de una cantidad de luz brillante en los ojos suficiente para desencadenar precisamente la respuesta fisiológica errónea y determinar un sueño escaso. Conforme pasa el tiempo, se va acumulando déficit de sueño.

En las estancias largas, los astronautas se ven obligados a desenvolverse en un volumen reducido, con un grupo pequeño y fijo de compañeros que arrastran su propia cultura y aislados de la vida normal en Tierra. Esa combinación de realidades puede producir ansiedad, insomnio, depresión, tensión y otros problemas de relación que podrían afectarles no menos que la ingravidez. Dado que esos factores actúan al mismo tiempo que el organismo se va adaptando a otras situaciones ambientales, no está del todo claro a qué factores atribuir unos cambios fisiológicos u otros. Queda en eso mucho camino por recorrer.

Por último, los vuelos exponen a niveles de radiación bastante altos. El astronauta que pasara un año en una órbita terrestre baja, moderadamente inclinada, recibiría una dosis de radiación diez veces mayor que la dosis media recibida sobre la Tierra. Una estancia de un año en la Luna supondría una dosis siete veces mayor aún. Y peor resultaría el viaje a Marte. Una fuga súbita de partículas solares del tipo de la ocurrida en agosto de 1972 liberaría en menos de un día una dosis de radiación más de 1000 veces superior a la dosis anual recibida sobre la superficie terrestre. Para nuestra fortuna, se trata de sucesos raros; además, los ingenieros astronáuticos pueden proyectar salas blindadas especiales, en donde retirarse transitoriamente para protegerse de ese baño.

No es tranquilizador el riesgo de radiación en las misiones prolonga-

das, con el cáncer al acecho, además de resultar harto difícil abordar los problemas de la radiación espacial: es prácticamente imposible reproducir en la Tierra el ambiente radiactivo del espacio, con su flujo bajo y constante de rayos cósmicos de alta energía. Pese a ello, se admite que con el blindaje adecuado y la receta de fármacos protectores, los riesgos pueden llevarse a límites aceptables.

Cuando los astronautas vuelven al mundo del peso, se producen cambios complementarios. Si los efectos de la ingravidez son reversibles, todo tornará a su estado normal pasado algún tiempo. Sabemos que la mayoría de los sistemas del organismo funcionan de forma reversible, al menos durante los intervalos para los que tenemos datos. Pero ignoramos si nos hallamos ante una regla general.

Los astronautas sienten, por supuesto, la carga de la gravedad durante su descenso e inmediatamente después. A propósito de ello recordaba uno que “la primera vez que me puse de pie, sentí como si estuviera levantando tres veces mi peso”. Experimentan, confiesan, diversas ilusiones (al mover la cabeza es el entorno lo que parece dar vueltas); se tambalean al proponerse andar rectos, tengan los ojos abiertos o cerrados.

La mayoría de los sistemas del cuerpo vuelven a la normalidad días o semanas después del aterrizaje, con la posible salvedad del sistema musculoesquelético. Hasta ahora nada indica que el hombre no pueda desenvolverse y trabajar en el espacio durante largos períodos y volver a la Tierra para llevar una vida normal. Esa seguridad constituye, sin duda, una buena noticia para los instalados en la futura *Estación Espacial Internacional* y para cualquier misión interplanetaria. La estación proporcionará una nueva ocasión de investigar los efectos que los vuelos espaciales ejercen sobre el cuerpo humano. Una vez terminada, de aquí a cinco años, la estación ocupará 1302 metros cúbicos de espacio operativo (casi el quíntuplo de las estaciones *Mir* o *Skylab*); dispondrá de un refinado equipo de laboratorio para una nueva tanda de investigaciones médicas. La NASA ha tomado conciencia de la necesidad de un estudio exhaustivo, desde todos los frentes, sobre posibles riesgos en viajes de larga duración. Para acometerlo, definir los riesgos y buscar las medidas paliativas, ha creado el Instituto de Investigación Biomédica Espacial Nacional.

Muchos de los cambios “normales” que experimentan las personas sanas durante el vuelo espacial, o inmediatamente después, presentan un aire similar a los acontecimientos “anómalos” que sufren personas enfermas aquí en el suelo. Ocurre, por ejemplo, que la mayoría de los astronautas al aterrizar se ven incapaces de permanecer quietos de pie más de diez minutos sin marearse. Se trata de la misma intolerancia ortostática que aqueja a los pacientes que han estado en cama largo tiempo o a algunas personas mayores. El reposo prolongado en cama se traduce también en pérdida muscular y ósea. El paralelismo resulta tan estrecho, que se recurre al descanso en cama para simular los efectos del vuelo espacial.

Determinados cambios funcionales asociados a la edad hallan manifiesta correspondencia con los provocados por el vuelo espacial. El tambaleo tras el aterrizaje recuerda la tendencia a caerse de los ancianos; la pérdida de hueso en el espacio es análoga a la osteoporosis relacionada con la edad. La inmunodeficiencia, el sueño escaso y la pérdida de coordinación motriz se dan por igual en los astronautas y las personas mayores. Aunque el paralelismo de los síntomas no implica paralelismo de las causas, los datos son tan clamorosos, que la NASA y el Instituto Nacional sobre el Envejecimiento trabajan en colaboración desde 1989. Con el senador John Glenn de nuevo en el espacio, los trabajos de investigación en ese dominio de la medicina deben intensificarse.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROCEEDINGS OF A CONFERENCE ON CORRELATIONS OF AGING AND SPACE EFFECTS ON BIOSYSTEMS. Dirigido por R. L. Sprott y C. A. Combs en *Experimental Gerontolgy*, vol. 26, n.os 2-3, págs. 121-309; 1991.

ORIENTATION AND MOVEMENT IN UNUSUAL FORCE ENVIRONMENTS. James R. Lackner en *Psychological Science*, vol. 4, n.o 3, páginas 134-142; mayo 1993.

SPACE PHYSIOLOGY AND MEDICINE. Tercera edición. A. E. Nicogossian, C. L. Huntoon y S. L. Pool. Lea y Febiger, 1993.

APPLIED PHSYSIOLOGY IN SPACE. Número especial del *Journal of Applied Physiology*, vol. 81, n.o 1, páginas 3-207; julio 1996.

Einstein, Hilbert y la teoría general de la relatividad

La formulación casi simultánea por Hilbert y Einstein de las ecuaciones de campo, corazón de la teoría general de la relatividad, dio pie a una interpretación errónea de la prioridad. El error lo ha aclarado el autor

Leo Corry

El 20 de noviembre de 1915, David Hilbert leía una ponencia ante la Real Sociedad de Ciencias de Gotinga. Una más en su largo haber en aquella docta institución. Hilbert (1862-1943) era ya una figura consagrada de la matemática más allá de las paredes de la Sociedad. A primera vista, pues, se trataba de un acontecimiento rutinario.

Pero el tema abordado, así como las circunstancias que rodearon la conferencia y sus consecuencias, tejen un episodio crucial de la historia de la ciencia de la primera mitad del siglo: la formulación casi simultánea —al menos en apariencia— por Hilbert y Albert Einstein de las ecuaciones de campo de covariancia general, que constituyen el corazón de la teoría general de la relatividad (TGR).

Durante ese mismo mes de noviembre, Einstein (1879-1955) presentó cuatro ponencias sobre gravitación y relatividad en sesiones semanales consecutivas de la Academia Prusiana de Ciencias en Berlín. Sólo en la última de ellas, la del 25 de noviembre (es decir, cinco días después de la lección de Hilbert), expuso Einstein lo que vendría a conocerse como la versión definitiva de sus ecuaciones.

LEO CORRY enseña historia de la ciencia en la Universidad de Tel-Aviv. Especialista en historia del álgebra moderna y desarrollo del enfoque estructural, ha estudiado el trabajo de David Hilbert en Gotinga. Ha sido investigador invitado en el Instituto Max-Planck de Berlín y en el Instituto Dibner de Historia de la Ciencia del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Culminaba Einstein uno de los períodos más excitantes de su carrera científica; un período, iniciado en 1912, erizado de dificultades en su avance hacia la TGR. La formulación de las ecuaciones de covariancia general (es decir, ecuaciones cuya forma se mantiene invariante bajo cualquier tipo de transformación de coordenadas) fue la pieza decisiva para la coronación exitosa de su empeño.

Meses antes, en el verano de 1915, Einstein había visitado Gotinga, invitado por Hilbert, para exponer el estado en que se encontraban sus investigaciones. Quedó impresionado con la personalidad de Hilbert. Con él mantuvo una fluida correspondencia en el intervalo crítico que precedió a la publicación de las ecuaciones. En el mes de noviembre se produjo entre ellos un intenso intercambio de pareceres e ideas, a veces a diario. Ese intercambio resultó decisivo para el respectivo avance hacia la formulación de las ecuaciones.

La ponencia de Hilbert dictada en Gotinga llevaba por título *Die Grundlagen der Physik* (“Los fundamentos de la física”). La pronunció dos días después de que Einstein presentara su tercera comunicación ante la Academia de Berlín.

Dicha comunicación de Einstein encerraba especial interés. Las ecuaciones formuladas en ella aportaron la primera explicación satisfactoria del fenómeno intrigante de las anomalías detectadas en el movimiento perihélico de Mercurio. Einstein consideraba que la resolución de ese viejo enigma astronómico representaba un éxito innegable de su teoría. (Las ecuaciones que allí aparecían sufrieron, sin embargo, algunos retoques más tarde.) En cuanto Hilbert recibió por correo el borrador de la comunicación se aprestó a escribirle felicitándole por el logro. Lo que no impidió que prosiguieran, cada uno por su lado, en la búsqueda de ecuaciones de campo más adecuadas. Pudieron presentarlas una semana después, primero Hilbert y luego Einstein.

Las ecuaciones de Hilbert se publicaron en marzo de 1916 en el órgano oficial de la Sociedad Científica de Gotinga. Einstein presentó las suyas en la cuarta comunicación ante la Academia Prusiana. Salvo en pequeños detalles, coincidían (*véase recuadro*). Se operó así lo que parece ser un ejemplo asombroso de descubrimiento simultáneo, protagonizado por dos de los más prominentes científicos alemanes de su época; un hallazgo que constituye, por otra parte, uno de los hitos de la ciencia del siglo XX.

El singular episodio no ha dejado de atraer la atención de físicos e historiadores. Nosotros nos ceñiremos al telón de fondo del escenario en que ocurren los acontecimientos; en particular, nos detendremos en un documento revelador que he descubierto en el curso de mi investigación sobre la matemática en Gotinga. Ese documento, que acabo de hacer público, permite responder con pruebas tangibles a la cuestión de la prioridad.

En 1912 Einstein dejaba la Universidad de Praga para retornar a Zurich, donde años atrás había estudiado y obtenido su primer puesto académico en 1909. Desde su retorno a Suiza, se procuró la ayuda de un viejo amigo, el matemático Marcel Grossmann (1878-1936), en su empeño de elaborar una teoría relativista de la gravitación. Esta teoría

1. ALBERT EINSTEIN Y DAVID HILBERT trabajaron en intensa colaboración mientras se proponían obtener separadamente las ecuaciones de campo de covariancia general, núcleo de la teoría general de la relatividad. Einstein, que aparece fotografiado aquí en su visita a la Universidad de Madrid en 1923, fue quien desarrolló la teoría desde un principio. Hilbert (*derecha, abajo*) llegó a ella desde un punto de partida totalmente diferente, y aun cuando intentó derivar las ecuaciones por cuenta propia, nunca puso en duda que la teoría como tal debería ser atribuida en su totalidad al genio de Einstein.



conllevaba la ampliación del grupo de transformaciones bajo las cuales las teorías físicas deberían ser invariantes; la extensión abarcaría un grupo menos restringido que el de las "transformaciones de Lorentz", grupo que Einstein había adoptado como base de la teoría especial de la relatividad, formulada en 1905.

Grossmann le indicó a Einstein que el lenguaje matemático adecuado para emprender esa generalización podría tomarse de la teoría de los espacios riemannianos, así como del cálculo tensorial desarrollado hacia fines del siglo XIX por Gregorio Ricci-Curbastro (1853-1925).

Visto en retrospectiva, el requisito de covariancia general ha venido a considerarse el sello que identifica la teoría general de la relatividad. En su afán de hallar una formulación correcta de la teoría, Einstein se guió por diversos principios y exigencias fundamentales. La importancia que Einstein confería a cada uno de ellos pasó por múltiples avatares a lo largo de los años.

En las fases iniciales de su búsqueda, el requisito de covariancia general venía demandado por la voluntad de Einstein de imponer un principio físico que, en su opinión, constituía la base sobre la que descansaban los demás: el principio de equivalencia entre masa inercial y masa gravitatoria. El asumir este principio como válido para todos los fenómenos de la física —mecánica, electrodinámica, etcétera— implica la abolición de la distinción entre marcos de referencia acelerados y sin acelerar.

Ahora bien, esa distinción tiene cabida en la teoría newtoniana y en la teoría especial de la relatividad. Por tanto, Einstein concluyó lo siguiente: si tomamos el principio de equivalencia por clave de bóveda de una teoría relativista de la gravitación, entonces dicha teoría deberá generalizar el principio (especial) de relatividad formulado en 1905 para marcos de referencia inerciales (es decir, no acelerados). Una tal generalización debería ser válida para al menos algún tipo de marcos acelerados; eso significa que sólo queda por establecer el rango preciso del tipo de transformaciones de coordenadas a las cuales debería extenderse la relatividad. La adopción del lenguaje tensorial ayudó a Einstein a resolver esa cuestión, aunque a través de una vía larga y penosa.

Las ecuaciones de campo de Hilbert y sus varias versiones

La ponencia de Hilbert ante la Sociedad Científica de Gotinga tuvo lugar el 20 de noviembre de 1915. Su contenido se publicó en las *Transacciones de la Sociedad* en marzo del año siguiente, incluyendo las ecuaciones de campo de covariancia general:

$$\sqrt{g}\,(K_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}Kg_{\mu\nu}) = -\frac{\partial\sqrt{g}L}{\partial g^{\mu\nu}}. \qquad (*)$$

Aquí, $K_{\mu\nu}$ representa el tensor de Ricci, K es la curvatura de Riemann y L es una función que depende de los potenciales electromagnéticos q_s, y de sus derivadas q_{sk}, así como de los potenciales gravitatorios $g_{\mu\nu}$ (pero no de sus derivadas).

Hilbert afirmaba que estas ecuaciones de gravitación “parecían corresponder” a las de Einstein. Naturalmente, al leer la versión publicada de la ponencia de Hilbert, uno piensa en comparar las ecuaciones que allí aparecen con las ecuaciones definitivas de Einstein, es decir, con las que presentó cinco días después ante la Academia de Berlín:

$$K_{\mu\nu} = -\kappa(T_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}\,g_{\mu\nu}T). \qquad (**)$$

Y en efecto, aunque Hilbert no lo hizo en detalle, es posible derivar, a partir de (*), la ecuación

$$K_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}Kg_{\mu\nu} = -\kappa\,T_{\mu\nu},$$

que resulta ser equivalente a (**).

Es necesario notar aquí, sin embargo, que el tensor de energía de tensión $T_{\mu\nu}$ no tiene una auténtica contrapartida en la teoría de Hilbert, ya que esta última se basa en la teoría de Mie, en la cual la materia es considerada en términos puramente electrodinámicos. Pero si suponemos, como Hilbert, que este tensor queda totalmente determinado por variaciones en la función lagrangiana L, y si esta última depende tan sólo de la gravitación, obtenemos entonces que

$$T_{\mu\nu} = \frac{\partial L}{\partial g^{\mu\nu}}.$$

Esta última expresión permite establecer la equivalencia entre las ecuaciones de Hilbert y las de Einstein.

Pero las pruebas de imprenta fechadas el 6 de diciembre de 1915 indican que al dictar su charla en Gotinga Hilbert no tenía aún las ecuaciones (*). Las ecuaciones que Hilbert presentó no eran de variancia general; de hecho, ellas no mostraban explícitamente la expresión del componente gravitatorio. Su forma era:

$$[\sqrt{g}K]_{\mu\nu} + \frac{\partial\sqrt{g}L}{\partial g^{\mu\nu}} = 0,$$

donde

$$[\sqrt{g}K]_{\mu\nu} = \frac{\partial\sqrt{g}K}{\partial g^{\mu\nu}} - \sum_k \frac{\partial}{\partial\omega_k}\frac{\partial\sqrt{g}K}{\partial g^{\mu\nu}_k} + \sum_{k,l}\frac{\partial^2}{\partial\omega_k\partial\omega_l}\frac{\partial\sqrt{g}K}{\partial g^{\mu\nu}_{kl}} \quad (\mu,\nu=1,2,3,4).$$

Aparentemente, fue sólo después de haber visto la ponencia de Einstein, publicada el 2 de diciembre, cuando Hilbert reformuló las suyas según (*). En las galeradas, obviamente, Hilbert tampoco menciona la aparente correspondencia entre sus ecuaciones y las de Einstein. En la versión que se publicó en marzo de 1916, Hilbert justificó la forma explícita de las ecuaciones con un argumento matemático que resultó ser incorrecto. Esto no se corrigió hasta 1924.

En 1913 Einstein y Grossmann publicaron el *Esbozo de una teoría generalizada de la relatividad y de una teoría de la gravitación*, donde se representaba el campo gravitatorio por medio del tensor métrico, $g_{\mu\nu}$, que simultáneamente denotaba la estructura del espacio-tiempo. Por primera vez, la estructura del espacio-tiempo aparecía, no como un ente dado *a priori*, sino como entidad sujeta a ecuaciones dinámicas y dependiente del campo gravitatorio mismo y de sus fuentes. Este cambio radical de concepción fue otro de los pasos fundamentales que debían tomarse en la vía hacia la TGR.

Al generalizar el dominio de validez del principio de relatividad, lo ideal sería no imponer de entrada ningún tipo de limitaciones, sino establecer ecuaciones de covariancia general. Por otro lado, como la teoría newtoniana había demostrado con creces su eficacia descriptiva de los procesos gravitatorios, parecería razonable buscar ecuaciones de campo que generalizaran la de esta teoría, es decir, la ecuación de Poisson: $\Delta\varphi = 4\pi\kappa\rho$, donde Δ representa el operador laplaciano, κ es una constante y ρ es la densidad de masa.

La generalización tensorial de la teoría newtoniana sugeriría que el término gravitatorio (miembro izquierdo de la ecuación) habría de involucrar derivadas segundas de la métrica, lo que supondría una generalización relativista del potencial gravitatorio newtoniano, mientras que en la fuente (miembro derecho de la ecuación) debería aparecer el tensor de energía de tensión, que sería la generalización relativista de la masa newtoniana.

La aportación de Grossmann en la generalización consistió en indicar a Einstein que el tensor de curvatura de Riemann era el único tensor que podía formarse a partir del tensor métrico y de sus derivadas primeras y segundas; manifestó, además, que la contracción de ese tensor, es decir, el tensor de Ricci, podría ser el único candidato de covariancia general a ocupar el lugar del término gravitatorio.

Pero entre 1912 y 1915 Einstein rechazó ese posible candidato para sus ecuaciones de campo; desechó, por ende, la covariancia general como requisito básico de su teoría. Y así, en la doctrina presentada en el *Esbozo* de 1913, igual que en las versiones elaboradas hasta 1915, las ecuaciones son invariantes sólo bajo el grupo de las transformaciones lineales, con todo clase más general que la del grupo de Lorentz.

Los motivos que indujeron el rechazo del requisito de covariancia general se les escapaban a físicos e historiadores. Sólo la investigación reciente ha aclarado ese interesante capítulo de la historia de la ciencia. Los trabajos de John Norton, Jürgen Renn, John Stachel, Tilman Sauer y otros han desbrozado el camino. Ellos han estudiado, clasificado y comen-

tado la ingente cantidad de material manuscrito que nos ha quedado de aquella época, recreando la evolución del pensamiento de Einstein en este asunto. Reviste particular interés a este respecto el "Cuaderno de Zurich", un mazo enmarañado de 96 páginas que abarca breves notas, esquemáticos cálculos y crípticas sugerencias; Einstein lo juntó al azar, sin orden ni concierto, sin fechas siquiera, aunque de su contenido se infiere que pertenece a sus días de Zurich, mientras se hallaba enfrascado en el desarrollo de la TGR.

Mediante el estudio del Cuaderno de Zurich y otros documentos, publicados o inéditos, los historiadores han reconstruido los vaivenes que caracterizaron la evolución del pensamiento de Einstein en su avance hacia la TGR. Uno de los aspectos más fascinantes de esa trayectoria tortuosa nos lo ofrece el papel desempeñado por el famoso "argumento del hoyo". Einstein lo formuló en 1913. De acuerdo con dicho argumento, no se puede describir el fenómeno gravitatorio por medio de ecuaciones de covariancia general, ya que tales ecuaciones, presumiblemente, determinarían de manera *no única* el campo gravitatorio en una región carente de materia (un "hoyo").

Einstein procedía del modo siguiente: aceptemos la existencia de una distribución de masa tal, que el tensor de energía de tensión $T_{\mu\nu}$ se anule sólo en el interior de dicha región, y supongamos que disponemos de ecuaciones de campo que sean de covariancia general, así como un sistema de soluciones $g_{\mu\nu}$ para cierto sistema de coordenadas x_{μ}. Para Einstein, la covariancia general podría admitir una segunda solución, $g'_{\mu\nu}$, idéntica a la primera fuera del hoyo, que variara gradual y continuamente desde su frontera hasta llegar a diferir de aquélla dentro de él. Sin embargo, consideraba problemática esta segunda solución, pues contradecía quizás el principio de la causalidad al no poderse determinar de manera unívoca los procesos físicos que acontecen en el interior del hoyo.

Einstein no podía llegar al final de su búsqueda mientras no abandonara el argumento del hoyo y aceptara la posibilidad de ecuaciones de campo de covariancia general. Lo que no sucedió hasta la última semana de noviembre de 1915, tras caer en la cuenta de un aspecto sutil, concerniente al significado físico de las transformaciones de coordenadas.

Einstein venía dando por supuesto que los puntos que se encuentran dentro del hoyo poseían individualidad física, antes incluso de que el tensor métrico quedara especificado en su interior. Con esa premisa, su razonamiento era válido. Pero hacia finales de 1915 advirtió la falacia encerrada en su explicación, al comprender que las propiedades físicas de los puntos del interior del hoyo dependían de la métrica; no existían, pues, antes de especificar ésta.

Durante su estancia en Zurich y posterior traslado en abril de 1914 a Berlín hasta pasado el otoño de 1915, Einstein elaboró varias versiones de las ecuaciones de campo de gravitación, que *no* satisfacían la covariancia general. Adujo que sus ecuaciones eran invariantes bajo la clase de transformaciones más amplia posible y a las que no podía aplicarse el argumento del hoyo.

El escenario cambió durante los meses decisivos de octubre y noviembre de 1915, a raíz de su visita a Gotinga y su intensa correspondencia con Hilbert. ¿Qué hacía mientras tanto Hilbert?

Desde comienzos del siglo XX la supremacía matemática de Gotinga resultaba ya indiscutible. Felix Klein (1849-1925), arquitecto de su prestigio, había traído a Hilbert desde Königsberg en 1895. En 1902 rehusó éste la cátedra que se le ofreciera en Berlín, alterando así definitivamente el equilibrio de fuerzas entre ambas universidades. Hilbert agregó ese mismo año una tercera cátedra matemática, creada para su amigo Hermann Minkowski (1864-1909). En los años siguientes habrían de sumarse Carl Runge (1856-1927) y Ludwig Prandtl (1875-1953), así como el astrónomo Karl Schwarzschild (1873-1916) y el geofísico Emil Wiechert (1861-1928). En la misma universidad trabajaban Ernst Zermelo, Otto Blumenthal, Max Abraham, Max Born, Ernst Hellinger y otros.

La carrera matemática de Hilbert arrancó con importantes contribuciones a la teoría de los invariantes algebraicos y a la teoría algebraica de los números. En 1899 publicó *Fundamentos de la geometría*, obra clásica sobre cuyo tema central siguió trabajando los primeros años del nuevo siglo. Desde 1903 hasta 1912, se centró en la teoría de las ecuaciones integrales.

Compartía su profesión matemática con un vivo interés por la física contemporánea. Desde 1898 había dictado cursos y seminarios sobre mecánica, mecánica de fluidos, estructura de la materia, teoría cinética de los gases y teoría de la radiación. En 1912 empezó a publicar sobre los fundamentos matemáticos de tales disciplinas.

La verdad es que en Gotinga físicos y matemáticos colaboraron estrechamente. Uno de los frutos más provechosos de esta colaboración fueron los trabajos de Minkowski, entre 1907 y 1909, sobre fundamentación matemática de la teoría especial de

Sutil reconocimiento de Hilbert de la prioridad de Einstein

En el párrafo introductorio del artículo de marzo de 1916 Hilbert reconocía la prioridad: "Los impresionantes problemas formulados por Einstein, los profundos métodos que él desarrolló para resolverlos y las concepciones originales y potentes por medio de las cuales Mie elaboró su electrodinámica, han abierto nuevas vías en la investigación de los fundamentos de la física."

Pero no era ésa la forma en que Hilbert presentó originalmente los dos componentes de su teoría. En las galeradas de diciembre podía leerse: "Las concepciones originales y potentes por medio de las cuales Mie elaboró su electrodinámica, los impresionantes problemas formulados por Einstein y los profundos métodos que él desarrolló para resolverlos, han abierto nuevas vías en la investigación de los fundamentos de la física."

Al abordar la historia de la relatividad desde la perspectiva de los trabajos de Einstein, la versión publicada en marzo es la que haría más justicia al peso específico de cada uno de los componentes de la teoría de Hilbert. Sin embargo, desde el punto de vista de la evolución de su pensamiento, la versión original refleja con mayor fidelidad su historia personal: al abordar la teoría de la relatividad, Hilbert se fijó primero en la teoría de Mie, donde sus intereses encontraron eco; más tarde prestó atención a la de Einstein.



2. MAX BORN, fotografiado aquí en su época de estudiante, fue el más destacado de los físicos que trabajaron en el círculo cercano a Hilbert en Gotinga. Fue él quien despertó el interés de Hilbert en la teoría de Gustav Mie como una posible base para la fundamentación de la física toda.

la relatividad, que Einstein acababa de formular. Hilbert y Minkowski examinaron a fondo el armazón teórico de la teoría de la relatividad, mientras iba madurando en la mente de Minkowski. Tras la muerte prematura de éste en 1909, Hilbert siguió diseminando sus ideas en los cursos de física que dictó en Gotinga.

A partir de 1911 Hilbert se interesó por la estructura atómica de la materia. En 1912, Gustav Mie (1868-1957), a la sazón en la Universidad de Halle, describía el electrón y sus propiedades físicas como una singularidad en el éter electromagnético. Mie no abrió el surco, pero sí fue probablemente el primero en elaborar una teoría más o menos coherente y con apoyatura matemática. Dicha teoría admitía la relatividad especial, pero rechazaba la posibilidad de generalizar este principio. La teoría de Mie constituía una generalización de la geometría plana del espacio-tiempo que Minkowski había desarrollado con anterioridad.

Max Born (1882-1970) elaboró algunas ideas de Mie en el año 1913 y logró entusiasmar a Hilbert con ellas. Durante 1914 y 1915 Hilbert estudió a fondo la teoría y sus consecuencias. Y la adoptó como esquema medular de un programa unificado de fundamentación de la física, donde los distintos fenómenos de la naturaleza se consideraran expresiones de una sola realidad electromagnética subyacente.

En las reuniones de la sociedad matemática de Gotinga, presididas siempre por Hilbert, se pasó revista a los recientes trabajos de Einstein; se comentó, en particular, el *Esbozo de una teoría de gravitación*, escrito con Grossmann. Incidentalmente, Mie se propuso, sin conseguirlo, incorporar en su teoría los fenómenos gravitatorios. En diferentes ocasiones a lo largo del año 1914, Mie y Einstein se enzarzaron en agria disputa sobre las ventajas y desventajas de sus respectivas teorías a la hora de considerarlas posibles generalizaciones relativistas de la teoría newtoniana de la gravitación.

Por tanto, al ser invitado Einstein a Gotinga en el verano de 1915, el ambiente estaba preparado para que Hilbert se aplicara a la solución de los problemas planteados por la TGR. Hilbert pensaba elaborar con mayor rigor las ideas avanzadas por Mie y resolver los problemas que éste había dejado pendientes.

Mas, a sugerencia de Born, Hilbert pensó que las ideas desarrolladas por Einstein le ofrecerían los medios adecuados para alcanzar su meta, que no era otra que hallar una teoría unificada de campo, una "fundamentación de la física". La combinación de las teorías de Mie con las de Einstein iba a servirle de base para lograrlo.

Einstein arribó a Gotinga en junio de 1915. Dictó seis conferencias sobre el estado de sus investigaciones en torno a la teoría general de la relatividad. Quedó gratamente impresionado por la recepción que le fue otorgada y, en particular, por la actitud de Hilbert. "En Gotinga he tenido el placer de ver que mis ideas fueron totalmente entendidas, hasta los últimos detalles", escribió a Sommerfeld, a su retorno a Berlín. Y añadía: "Especial entusiasmo me ha causado Hilbert. ¡Una personalidad impresionante!"

No hay datos que revelen la versión de su teoría que expuso Einstein en Gotinga. Parece verosímil que defendiera, modificada, la desarrollada con Grossmann, donde postulaba la invariancia de las ecuaciones gravitacionales bajo transformaciones lineales. Ni Klein ni Hilbert, que se sepa, objetaron la argumentación restrictiva de Einstein, en particular, el argumento del hoyo.

Llegado octubre, el entusiasmo de Einstein con sus resultados reforzado con su visita a Gotinga empezó a debilitarse. En carta del 7 de noviembre, confesaba a Hilbert que desde hacía algunas semanas estaba convencido del fallo de los métodos usados en sus

demostraciones. Desde ese momento, Hilbert y Einstein se enzarzaron en un amistoso reto intelectual: formular las ecuaciones del campo gravitatorio definitivas; ese duelo se reflejó en una correspondencia, a veces diaria, que les permitía seguir sus avances respectivos.

De las cuatro versiones que Einstein expuso ante la Academia de Berlín, la tercera, presentada el 18 de noviembre, constituyó un éxito. La teoría relativista de la gravitación daba cuenta precisa de las misteriosas anomalías encontradas desde 1859 en el movimiento perihélico de Mercurio. (La teoría newtoniana nunca había podido explicar el fenómeno.) Con todo, la tercera versión de la teoría no abandonaba aún las limitaciones autoimpuestas por Einstein sobre la clase de transformaciones admitidas.

La ponencia de Hilbert ante la Sociedad Científica de Gotinga tuvo lugar dos días después. Se publicó en el número de marzo del año siguiente en la revista de la Sociedad, con inclusión de las ecuaciones de campo de covariancia general. Hilbert agregaba que sus ecuaciones de gravitación "parecían corresponder" con las de Einstein. ¿Hasta qué punto se parecen con las ecuaciones definitivas de Einstein? En muchísimo (*ver recuadro*), salvo que la teoría de Hilbert se basa en la teoría de Mie, que considera la materia desde un enfoque exclusivamente electrodinámico.

Hilbert y Einstein terminaron por formular ecuaciones del campo gravitatorio que satisfacían el requerimiento de covariancia general. El curso de los eventos aquí descritos instó, inevitablemente, a preguntarse por la prioridad en el descubrimiento. Hilbert, digámoslo cuanto antes, nunca puso en duda la prioridad de Einstein. Siempre que habló de la teoría general de la relatividad no dejó de atribuir a Einstein "uno de los mayores logros jamás conseguidos por el espíritu humano".

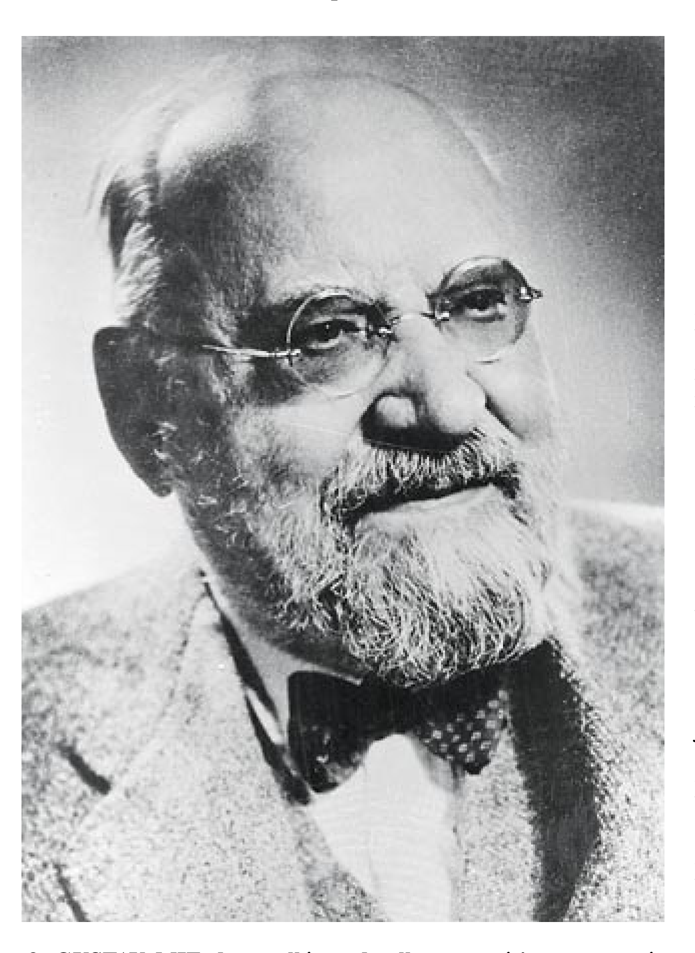
No ocurrió lo mismo con sus contemporáneos Klein, Wolfgang Pauli (1900-1958) y Hermann Weyl (1885-1955), quienes en algunas publicaciones y cartas otorgaron a Hilbert la prioridad en la derivación de las ecuaciones de campo. La reacción de Einstein en diciembre de 1915 parecería apoyar este punto de vista. En carta a un amigo de Zurich, junto a la confesión de la indecible alegría que siente por haber coronado su teoría, se quejaba (en alusión a Hilbert) de que "sólo un colega ha entendido cabalmente la teoría, y éste ha tratado de manera muy astuta de 'coapropiársela'".

Por si no estuviera claro le escribía a Hilbert con fecha del 20 de diciembre: "Ha habido últimamente entre nosotros un enfriamiento de las relaciones cuyas razones no quisiera analizar. Yo he tenido que luchar en mi interior contra todo resentimiento, y he conseguido vencerlo. De nuevo puedo volver a pensar en usted con sentimiento de amistad y le ruego que tenga para mí esa misma disposición. Sería una lástima que dos hombres como nosotros, cuyo trabajo los ha colocado por encima de este vil mundo, no se rindieran mutuo reconocimiento."

Los historiadores de la ciencia han venido repitiendo que Hilbert y Einstein llegaron casi simultáneamente a las ecuaciones de campo correctas, atribuyendo al primero su formulación correcta. Se ha sugerido incluso que fue Einstein quien "se coapropió" de los resultados de Hilbert, al identificar en una de las cartas de éste el crucial término de la traza, $-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}K$, agregado por Einstein sólo en su tercera ponencia del 18 de noviembre. Esta posibilidad queda descartada en cuanto vemos la enrevesada complejidad matemática del artículo de Hilbert. Einstein hubiera tardado muchísimo tiempo en entenderlo, si es que podía comprender las sutilezas de su contenido. Pese a todo, se seguía insistiendo en que Einstein desarrolló la teoría y Hilbert logró la prioridad en la formulación correcta de las ecuaciones cruciales.

En mis buceos en los archivos de Hilbert, conservados en la Universidad de Gotinga, di con un documento inédito, cuya información nos obliga a reinterpretar el curso de los acontecimientos arriba descritos. Se trata de las galeradas originales del artículo de Hilbert publicado en marzo de 1916. Un sello estampado en la primera página de estas cuartillas de prueba revela la fecha en que las recibió de la imprenta: 6 de diciembre de 1915, es decir, dos semanas después de dictar la ponencia.

El artículo publicado y las galeradas indican que leyó la ponencia el 20 de noviembre de 1915. Ahora bien, entre las pruebas de imprenta y el artículo finalmente impreso existen sustanciales diferencias que dejan ver de manera nítida las correcciones introducidas por Hilbert. En particular, las galeradas nos revelan sin ambigüedad que la disputa sobre prioridad carece ya de sentido: en la ponencia del 20 de noviembre ante la Sociedad Científica de Gotinga, Hilbert no incluyó ecuaciones de campo gravitatorio de covariancia general.



3. GUSTAV MIE desarrolló en detalle matemático una teoría electromagnética de la materia, esperando explicar a través de ella todos los fenómenos físicos, incluyendo la gravitación. Los físicos contemporáneos no le atribuyeron ningún interés a su teoría desde un principio.

En su versión publicada Hilbert hace referencia a la cuarta ponencia de Einstein, del 25 de noviembre, que apareció publicada el siguiente 2 de diciembre. Hilbert pudo haber introducido los cambios necesarios en su artículo después de haber leído el de Einstein.

Para explicar con exactitud las diferencias entre el contenido original de la ponencia de Hilbert y el de su versión impresa deberíamos discutir todos los detalles del trabajo, algo que sobrepasa el presente marco. Me limitaré, pues, a señalar algunos puntos generales que le permitan al lector hacerse una idea de lo sucedido.

En las galeradas, Hilbert afirmaba expresamente que su teoría *no podía* satisfacer la covariancia general. Para que no quedaran dudas del punto de referencia pertinente, Hilbert razonaba la necesidad de agregar a las diez ecuaciones diferenciales —que corresponden en su teoría a los fenómenos gravitatorios y que son de covariancia general— otras cuatro ecuaciones para los procesos electromagnéticos, de covariancia más limitada, ya que de lo contrario se estaría violando el principio de causalidad. En otras palabras, a estas alturas Hilbert está todavía aceptando en su totalidad las consecuencias del argumento del hoyo de Einstein.

En la versión publicada en marzo, por contra, Hilbert abandonó este argumento. Y en la segunda parte de su trabajo, publicada en 1917, dio una nueva definición de la causalidad dentro de una teoría de covariancia general, definición que se sigue utilizando todavía hoy. Más aún, en esa oportunidad Hilbert recordaba que Einstein postuló, en las versiones anteriores de su teoría, ecuaciones de covariancia limitada.

La correspondencia entre Hilbert y Einstein nos manifiesta que abandonaron el argumento del hoyo y sus consecuencias de manera casi simultánea, por mutua influencia. Pero las galeradas nos demuestran que Hilbert no lo hizo antes de ver los resultados definitivos de Einstein.

Otra diferencia de interés es la siguiente: en las galeradas Hilbert presentó un lagrangiano que incluye el término gravitatorio, e indicó que el componente gravitatorio de las ecuaciones aparece como una derivada variacional del término gravitatorio con respecto a la métrica $g_{\mu\nu}$, tal y como debe serlo en la teoría. Sin embargo, él no presentó de manera alguna la forma explícita de este componente gravitacional. Por contra, en la versión publicada las ecuaciones aparecen de forma explícita, según hemos mencionado.

Y lo que reviste mayor interés: Hilbert explica que las ecuaciones se justifican directamente, sin ningún cálculo adicional, debido a que el tensor de Ricci que aparece en ellas, $K_{\mu\nu}$, es el único tensor de segundo orden (fuera de $g_{\mu\nu}$), mientras que la traza K es el único invariante que puede construirse a partir de los $g_{\mu\nu}$ y de sus derivadas primeras y segundas. Pero este argumento es matemáticamente incorrecto; lo advirtió Hilbert, quien, al republicar estos trabajos en 1924, reformuló el argumento, introduciendo una explicación general del cálculo apropiado del término gravitatorio.

Hilbert nunca comentó explícitamente los cambios que introdujo en las varias versiones de su teoría. Junto con eso, terminó por comprender la mayor profundidad y generalidad de la teoría einsteiniana y siempre le concedió el crédito que se merecía.

Otro punto de interés concierne al significado de los problemas físicos involucrados y el enfoque con que uno y otro los afrontaba. Según hemos señalado, la complejidad de los problemas y de su interrelación con los formalismos matemáticos desarrollados para explicarlos eran un punto de interés crucial para Einstein; en su solución invirtió Einstein esfuerzo y tiempo. Lo admite en carta a Hilbert del 18 de noviembre: "No tuve ninguna dificultad en encontrar las ecuaciones de covariancia general para los $g_{\mu\nu}$. Eso es fácil con ayuda del tensor de Riemann. Lo que es en verdad difícil es reconocer que esas ecuaciones constituyen una generalización; más aún, una generalización simple y natural de las leyes de Newton." Este tema, tan importante para Einstein, nunca fue mencionado por Hilbert, quien pasó muy por encima de esos problemas y es probable que ni siquiera conociera el significado real de todos.

Cometeríamos una grave injusticia histórica si dejásemos nuestra exposición en la denuncia del plagio. La verdad reclama un planteamiento de más vuelo. Hemos recordado el peculiar estilo de investigación que caracterizó a la escuela de Gotinga en la época de Hilbert y Klein; un estilo y un ambiente de trabajo donde el eje central de la actividad académica lo constituía la interacción entre profesores y alumnos.

En ese medio, la investigación realizada por uno contaba con el concurso de ideas, técnicas y problemas aportados por otros y que pasaban directamente a formar parte del patrimonio común. A veces, se comentaban ideas nacidas en otros centros, se reformulaban y desarrollaban según los intereses locales. En esa atmósfera no siempre es fácil distinguir la paternidad y la deuda intelectual. De ahí el término "coapropiarse" que Einstein menciona en su carta, y que atribuía a Max Abraham, quien había trabajado anteriormente en Gotinga. Un término que no es sinónimo de plagio.

Quizá no lleguemos nunca a saber con certeza las motivaciones y las circunstancias que llevaron a Hilbert a introducir los cambios en la corrección de las pruebas de su ponencia. Pudo haber, en dosis variables, malicia, ambición, ingenuidad y reconocimiento auténtico. Lo cierto es que desde un comienzo no cabía la posibilidad de que se arrogara la prioridad del desarrollo de la teoría einsteiniana. Ni lo necesitaba. Hilbert gozaba ya de sólida fama en la comunidad científica. Queda, además, su producción posterior: en sus conferencias, cursos y publicaciones, nunca cesó de atribuir la teoría general de la relatividad a Einstein, ni dudó tampoco en calificarla como "la creación más notable del espíritu humano".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOW EINSTEIN FOUND HIS FIELD EQUATIONS. J. Norton en *Einstein and the History of General Relativity*, dirigido por D. Howard y J. Stachel, págs. 101-159; Birkhäuser, Boston, 1989.

EINSTEINS ZÜRICHER NOTIZBUCH. J. Renn y T. Sauer en *Physikalische Blätter*, vol. 52, págs. 865-872; 1996.

BELATED DECISION IN THE HILBERT-EINSTEIN PRIORITY DISPUTE. L. Corry, J. Renn, y J. Stachel en *Science*, vol. 278, págs. 1270-1273; 14 de noviembre, 1997.

HERMANN MINKOWKSI AND THE POSTULATE OF RELATIVITY. L. Corry en *Archive for History of Exact Science*, vol. 51, n.º 4, págs. 273-314; 1997.

PERFILES

Gary Stix

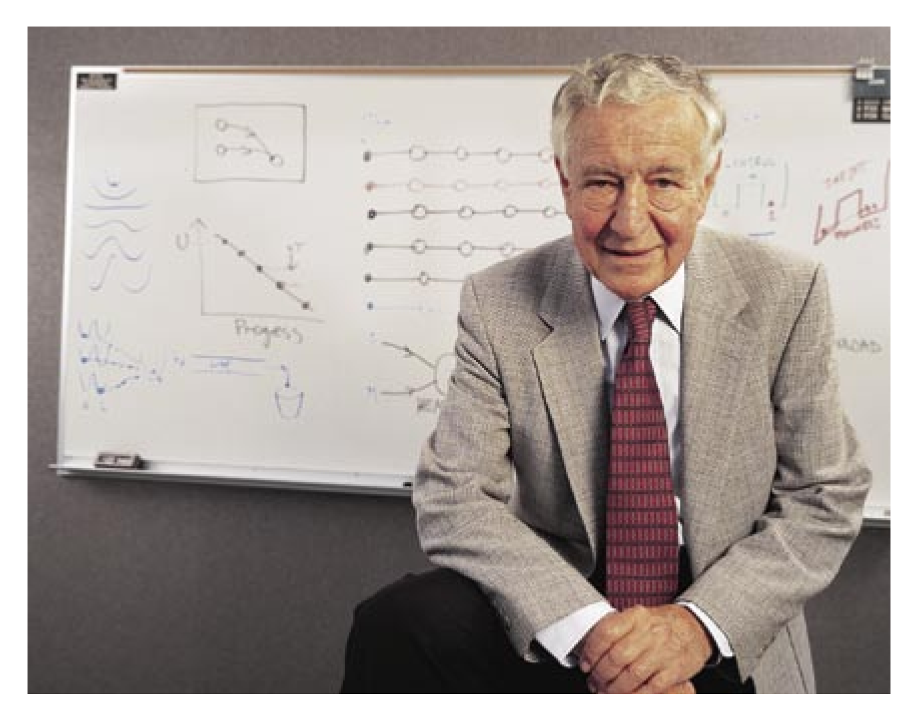
ROLF LANDAUER: A lomos de los electrones

En 1952, un joven físico visitaba una vetusta nave industrial de Poughkeepsie, "la cacharrería" la llamaban los dueños, en el estado de Nueva York. A sus 25 años, aquel mozo resuelto iba en busca de un nuevo trabajo, harto del bienio pasado en el Comité Asesor Nacional de Aeronáutica (predecesor de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio, la NASA). Aquí tuvo alguna relación con un proyecto de avión a reacción propulsado con energía nuclear.

IBM, la empresa a cuyas puertas había llamado, iniciaba una onerosa transición: dejar las máquinas de calcular que usaban relés electromecánicos para pasarse a las que llevaban tubos de vacío. Se miraba al futuro con cautela. La compañía necesitaba físicos para un pequeño grupo de investigación en semiconductores, establecido con ánimo de cubrirse las espaldas ante la remota posibilidad de que la técnica del transistor acabara fraguando en algo. "El futuro de IBM está en los semiconductores, y ellos ni siquiera se dan cuenta", le confió el directivo con el que se entrevistó.

Rolf Landauer, tal era el postulante, recuerda esas palabras 45 años después, en su pulcra oficina del airoso edificio de cristal (diseñado por Eero Saarinen) que alberga las instalaciones principales de investigación de IBM al noroeste del condado de Westchester. "Tuve mucha suerte de que mi carrera coincidiera con una época maravillosa", observa.

El cambio de los aviones nucleares a los microcircuitos reproduce fielmente la trayectoria de la técnica de la segunda mitad del siglo XX, una época en la que la fascinación por los viajes espaciales y el poderío nuclear dejó paso a la preocupación por el movimiento de los electrones en pequeños espacios. Landauer contribuyó a definir, en su nivel más fundamental, la cantidad de trabajo útil que una máquina de cómputo puede realizar en esos diminutos confines. "Con él comenzó realmente el campo de la física de la computación", dice Seth Lloyd, un teórico de vanguardia en el uso de los principios de la mecánica cuántica para la computación, profesor de ingeniería mecánica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.



1. Los límites de la computación y la cinemática de pequeñas estructuras son ideas que Rolf Landauer prefiere comunicar con imágenes más que con números

El axioma básico del pensamiento de Landauer es que la información no es una abstracción matemática, sino que posee entidad física, esté almacenada en un ábaco, una tarjeta perforada o en una neurona. Empezó él por preguntarse cuánta energía se requiere para cada paso computacional. Identificar un mínimo establecería un límite básico similar a las leyes de la termodinámica, que proporcionaban la eficiencia de las máquinas de vapor del siglo XIX, o a la teoría de la información de Claude E. Shannon, con la que se calculan cuántos bits pueden transmitirse por un cable.

La inspiración primordial le llegó en 1961, cuando cuestionó la hipótesis dominante de John von Neumann, según la cual cada paso de una computación binaria requería un gasto de energía mínimo, aproximadamente el correspondiente al movimiento térmico de una molécula de aire. El artículo de Landauer apareció en el *IBM Journal of Research and Development*. Defendía que no era la computación en sí misma sino el borrar la información lo que libera una pequeña cantidad de calor. La idea —o principio de Landauer— de que no es procesar los bits lo que requiere un gasto energético, sino deshacerse de ellos, fue durante años criticada o dejada de lado. Ahora, esta piedra angular de la física de la información constituye un puntal de los ordenadores experimentales avanzados.

Quien sí se dio cuenta de este primer trabajo fue un posdoctorado inquieto del Laboratorio Nacional de Argonne. Durante un congreso en Chicago en 1971, Charles H. Bennett le explicó a Landauer cómo podría diseñarse un ordenador que soslayara el principio de Landauer mediante la estratagema de no deshacerse de la información, de modo que no se disipara ninguna energía. Bennett extendió el trabajo de Landauer mostrando que cada paso de computación se puede llevar a cabo

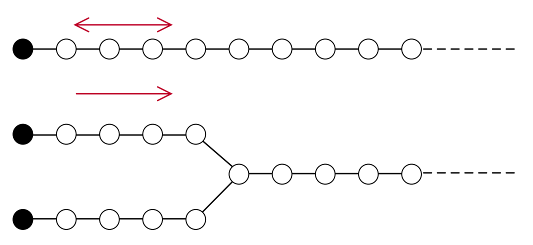
de una manera que permite deducir la entrada a partir de la salida, esto es, que la máquina puede funcionar hacia atrás. Un aparato así puede empezar por guardar la respuesta y dar entonces marcha atrás hasta llegar al principio. Se hurta a las pérdidas de energía estipuladas por el principio de Landauer, pues al no borrar información alguna, no se pierde energía. Otros investigadores han plasmado estas ideas en circuitos lógicos reversibles que pueden evitar que los pequeños circuitos de los ordenadores del futuro generen calor en cantidades que pueden llegar a ser fatales.

La relación de Landauer con Bennett guarda cierto parecido con la circularidad de la computación reversible. Al principio, fue Landauer el mentor, convenciendo al joven para que aceptara un puesto en IBM. A medida que Bennett refinaba y extendía el trabajo original de Landauer, éste se iba transformando en discípulo de aquél. La prueba de esta inversión puede observarse en un artículo publicado por Landauer en la revista *Science*. La reversibilidad de una operación de procesado de información (sugerida por Bennett en respuesta al trabajo de Landauer) era una de las ideas centrales del artículo, que trataba de los límites de la comunicación. El artículo demostraba que no se requiere un gasto mínimo de energía para enviar un bit de información. Por contra, los canales de comunicación ordinarios, en los que se tira la energía de la señal en el receptor, llevan a cabo una operación claramente irreversible. Landauer recurre a la imagen de un telesilla de dos asientos, uno de los cuales representa un 0 y el otro un 1. Los esquiadores (los bits del mensaje) se acomodan en uno de los dos asientos para subir a las pistas. Allí los bits se ponen todos en el asiento 0 para descender la montaña y volverse a usar en otro mensaje.

Landauer siempre ha sido consciente de lo que va del dicho al hecho. Ha explorado las fronteras de la computación, pero también ha sabido poner en tela de juicio la viabilidad de técnicas vanguardistas, como los ordenadores cuánticos. Y ha expresado sus dudas sobre el futuro de los ordenadores reversibles, un campo relacionado con su propio trabajo. “Toda propuesta técnica lleva aneja una servidumbre”, señala. “Una máquina reversible requeriría una circuitería mucho más compleja y lenta.”

Lloyd, del MIT, recuerda que no es extraño que Landauer le mande una carta cuando sale uno de sus artículos sobre computación cuántica. (Un ordenador cuántico es un tipo de máquina reversible que lleva a cabo muchos cálculos a la vez basándose en los principios de la mecánica cuántica, que permite que un mismo bit coexista en muchos estados a la vez.) Landauer sugiere que se inserte un aviso en la publicación: “Advertencia: es probable que los ordenadores cuánticos no funcionen en el mundo real”.

El contraste entre su arrojo teórico y su pragmatismo conservador le viene del cargo que ocupó durante los años sesenta, cuando dirigió el departamento de ciencias físicas de IBM; le correspondía decidir si financiar una técnica u otra. Dirigió los comienzos de los programas de la compañía para desarrollar el láser semiconductor y los circuitos integrados; acuñó la expresión “integración a gran escala”.



2. La computación reversible permite que las operaciones se lleven a cabo marcha atrás: la entrada puede deducirse de la salida (cadena horizontal). *De esta manera no se pierde información, no se disipa energía, y se cumple el principio de Landauer. La irreversibilidad tiene lugar cuando no se puede encontrar el camino de vuelta desde la salida hasta la entrada* (dos caminos que se juntan)

Su sentido de la realidad quizá tenga que ver con la dureza de su infancia de huido de la Alemania de Hitler. Landauer nació en Stuttgart en 1927 en el seno de una acomodada familia judía. Recuerda el patriotismo de su padre, un arquitecto fallecido en 1935, acortada su vida por una herida que recibiera cuando luchaba durante la Primera Guerra Mundial en el ejército alemán: “Al igual que muchos otros judíos que eran buenos alemanes, siempre pensaba que esa locura tenía que acabarse. Yo sigo vivo porque él murió en 1935. Nunca hubiéramos abandonado Alemania de haber continuado siendo él cabeza de familia.”

La familia se instaló en Nueva York, donde Landauer cursó sus estudios en la escuela pública, graduándose finalmente en el Instituto Stuyvesant. Tras ser admitido en la Universidad de Harvard, su tío le animó a matricularse en ingeniería eléctrica, no en física. Finalmente siguió un plan de estudios que mezclaba física y electrónica. Pero siempre que a lo largo de su vida le han dado a escoger, nunca ocultó su preferencia por la teoría sobre la gestión. Afortunadamente, su carrera coincidió con la época dorada de la investigación industrial, cuando para enfrascarse en la formación de galaxias o en los límites de la computación no había que estar adscrito al desarrollo de una técnica específica, como ocurre hoy.

Aparte de otros trabajos, se dio a conocer por teorías básicas relacionadas con la física de pequeñas estructuras. Puede describir cada una de sus teorías de una manera resuelta y metódica, inteligible para los que no están iniciados en las sutilezas de la mecánica cuántica. En una esquina de su impoluto escritorio descansan las carpetas de artículos y gráficos. Abre una, dedicada al transporte de electrones (o sea, al movimiento de electrones a través de pequeños espacios); luego, otra, consagrada a la mecánica estadística, una reflexión sobre el dispositivo más pequeño que pueda almacenar un bit 0 o 1 sin ser derribado de su estado por el ruido del ambiente. Landauer rehúye el recurso excesivo a las matemáticas en favor de un estilo llano e intuitivo, con imágenes de andar por casa: “Es como si estuviera montado a lomos de un electrón viendo pasar el panorama”. Una de sus principales contribuciones, la fórmula de Landauer, sirve para calcular la conductancia eléctrica (la cantidad de corriente que puede alcanzarse con un voltaje dado) a partir de la probabilidad de que un electrón que penetre en una estructura se abra paso hasta el otro lado, en vez de rebotar para salir por donde había entrado.

Se le nota preocupado con cuestiones que quizá nunca resuelva, y él lo sabe. ¿Cuán grande, por ejemplo, puede ser la memoria de un ordenador en un universo finito? ¿Hasta dónde podemos llegar en nuestra descripción del mundo?

Prevenir los desastres naturales

La actividad del Popocatépelt

Una larga cadena que atraviesa al país de este a oeste, formada por estructuras volcánicas de diferentes tipos y edades, domina el paisaje del México central. La nevada cumbre de 5426 metros de altitud del Popocatépetl sobresale entre ellas.

Sobre su presencia y actividad pueden encontrarse numerosas referencias en códices prehispánicos lo mismo que en crónicas coloniales y documentos más recientes. La reactivación del Popocatépetl en los últimos cuatro años puede involucrar un riesgo sin precedentes en la historia del país. En casos como éste, la actividad volcánica trasciende la pura geología y se transforma en un problema que, al parecer, condicionará los proyectos globales de desarrollo para el tercer milenio: la vinculación ciencia-sociedad y la evaluación de la vulnerabilidad de grandes núcleos de población ante fenómenos naturales.



1. Fumarola central del Popocatépetl. Fotografía de J. Meritano y J. A. Cortés (COREMI)

El Popocatépetl tiene una historia que comprende la destrucción de edificios volcánicos anteriores por episodios explosivos de violencia extrema. El edificio actual se construye sobre los restos de una estructura demolida hace unos 23.000 años. Numerosas erupciones de distinta naturaleza y grado de explosividad han llevado al Popocatépetl a sus presentes dimensiones.

Aunque no resulta fácil para los geólogos establecer una cronología exacta de las erupciones, se estima que las capaces de demoler al edificio tendrían un tiempo medio de retorno en el orden de los 20.000 a 40.000 años; las erupciones explosivas, productoras de intensas lluvias de ceniza sobre grandes extensiones, flujos de ceniza caliente que descienden a gran velocidad por los flancos del volcán y flujos masivos de lodo podrían repetirse en promedio cada 1000 a 4000 años; y los episodios de actividad moderada, de consecuencias menos graves, como el actual, tienen como período medio de recurrencia unos 40-50 años, con una tendencia a incrementarse.

No obstante, a lo largo del tiempo se han desarrollado en todo el altiplano numerosos asentamientos, en busca de los fértiles suelos volcánicos y el clima templado que domina por encima de la cota de los 2000 metros. Los largos intervalos de quietud, o de actividad moderada entre erupciones, en este tipo de volcanes explican la tendencia frecuente de distintas culturas del mundo a instalarse en su vecindad.

Que la actividad menor del Popocatépetl ha sido presenciada desde tiempos remotos se infiere de su nombre náhuatl, que significa "montaña que humea", y de la moderada fumarola que aparece en los glifos que lo representan. Sin embargo, otros códices, como el Telleriano Remense, muestran al glifo de ese volcán con una columna de humo que se levanta hasta las estrellas. Esta representación podría referirse a la última erupción explosiva que ocurrió hace unos 1100-1200 años.

Con estos antecedentes, y con una población que supera los 20 millones



2. Popocatépetl contrastando con la iglesia de Cholula en Puebla. Fotografía de J. Meritano y J. A. Cortés (COREMI)

en un radio de 100 kilómetros, y de varios cientos de miles en regiones más cercanas y vulnerables, se generó una gran inquietud cuando el Popocatépetl empezó a mostrar actividad fumarólica y microsísmica creciente en 1993. Esta situación se agudizó el día 21 de diciembre de 1994; tras una serie de señales sísmicas tectono-volcánicas y de explosión, se inició un episodio de emisión de ceniza volcánica sin precedentes desde 1919. Ante el carácter creciente de esa actividad, que provocó lluvias de ceniza en numerosas poblaciones al NE del volcán incluida la ciudad de Puebla, y el riesgo de fusión catastrófica de parte del glaciar que corona el flanco norte de la cumbre, se realizó una evacuación preventiva de las poblaciones que se encuentran a lo largo de las posible trayectorias de flujos de lodo resultantes de la mezcla de ceniza volcánica con el hielo fundido.

Esta fue la primera acción acometida por el plan de respuesta que se ha desarrollado en paralelo a la evolución del comportamiento del volcán. Tras una semana de expulsión continua, las emisiones de ceniza se hicieron discretas, con duraciones de algunos minutos. Estas "exhalaciones" continúan hasta la fecha. En marzo de 1996, la naturaleza de las exhalaciones cambió en cierta medida, cuando se detectó en el fondo del cráter un cuerpo creciente de lava. Hacia finales de abril de ese año, las exhalaciones se tornaron más explosivas. El día 30 del mismo mes, cinco escaladores que ignoraron las advertencias del riesgo murieron cerca del cráter, alcanzados por fragmentos de una explosión. El domo de lava creció rápidamente hasta julio de 1996, cuando llegó al 20 % de la capacidad del cráter. La salida de lava redujo su ritmo, y la frecuencia de las exhalaciones explosivas también, pero no así su intensidad. Las explosiones continuaron, alternadas con episodios más breves de salida de lava. El 30 de junio de 1997, la mayor de las explosiones registradas en el presente episodio produjo leves lluvias de ceniza sobre varias urbes, incluyendo la Ciudad de México. Pocas semanas después se reinicia un nuevo episodio de lenta salida de lava. Para diciembre de 1997, el cuerpo de lava alcanza el 38 % de la capacidad del cráter, pero actividad posterior lo reduce al 34 %

¿Qué puede esperarse de esta situación? Aunque el análisis estadístico de la actividad pasada favorece, en un factor de 40, un cuadro de actividad moderada, que termina sin consecuencias, sobre el escenario de actividad piroclástica mayor, es imperativo mantener un elaborado sistema de vigilancia y seguimiento instrumental de la actividad. La responsabilidad sobre los científicos que el reconocimiento temprano de los precursores representa, constituye un ejemplo palmario del papel de la ciencia para el milenio que se inicia.

SERVANDO DE LA CRUZ REYNA
Instituto de Geofísica
UNAM/CENAPRED
México

Hale-Bopp

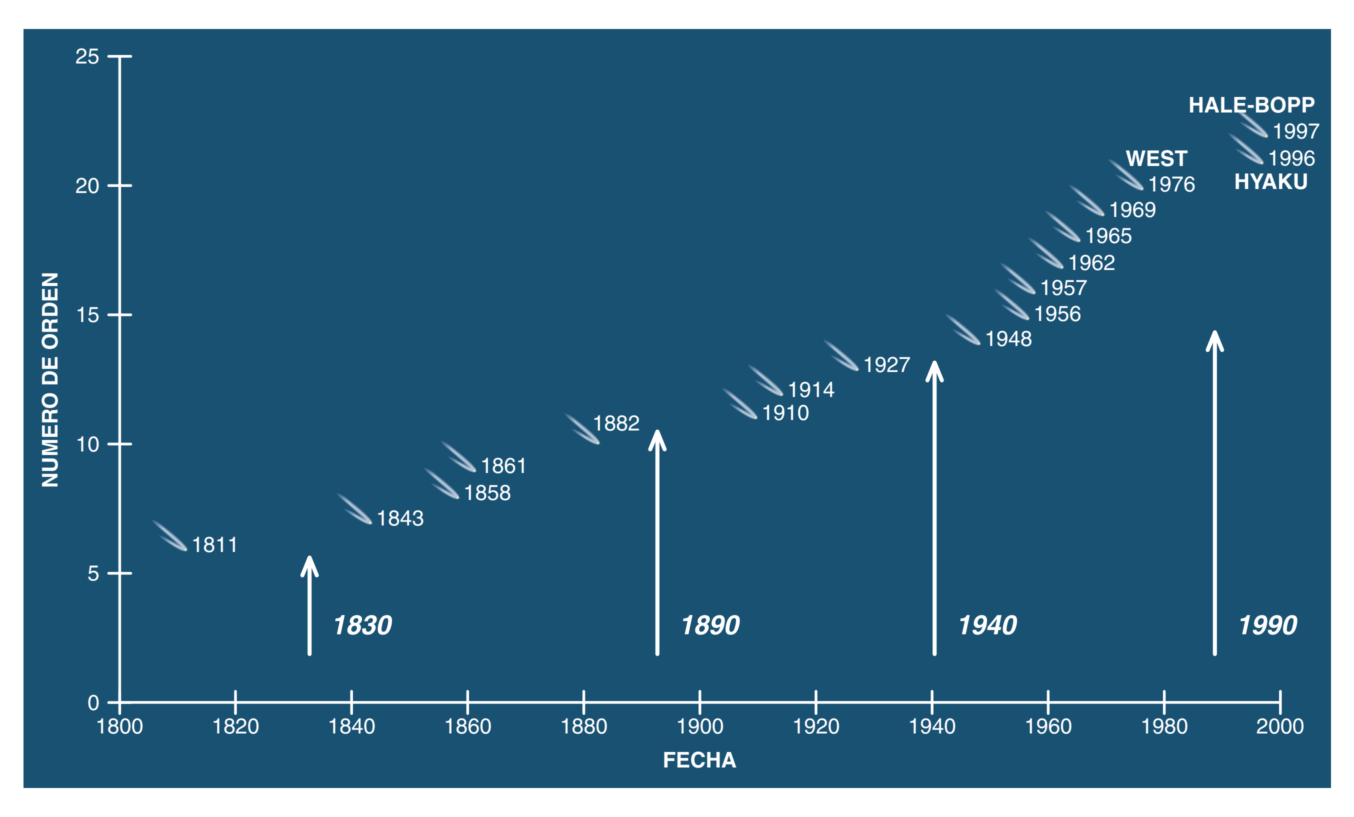
Las venidas de los cometas y la duplicidad del sistema solar

Estamos viviendo un final de siglo fecundísimo en fenómenos cometarios. Si bien desde 1976, año de la aparición del West, habíamos sufrido una sequía cometaria de dos decenios (la última venida del Halley no puede catalogarse como de gran cometa), en los dos últimos años los cometas Hyakutake y Hale-Bopp transformaron de forma espectacular nuestros cielos, sin olvidarnos del maravilloso recital ofrecido por Shoemaker- Levy 9, acaecido entre el 16 y 22 de julio de 1994, cuando 20 fragmentos del mismo se precipitaban sobre Júpiter. ¿Podremos observar antes del fin de siglo otro gran cometa?

La pregunta, pese a su sencillez, entraña la cuestión principal de la no predictibilidad de los cometas. Ninguna ley que conozcamos nos faculta para delimitar la cadencia de aparición de los grandes cometas. Esa aleatoriedad obedece, en buena medida, a su procedencia.

Según las ultimas teorías, el origen de los cometas puede ubicarse en una nube isotrópica de materia protoplanetaria, llamada nube de Oort, y cuyo radio podría situarse a 40.000 unidades astrónomicas del Sol (recordamos que 1 UA es la distancia media entre el Sol y la Tierra cifrada en 150 millones de kilómetros y que Plutón, el último planeta del Sistema Solar, está situado a 40 UA). Podríamos decir que los objetos de la nube de Oort son los últimos huéspedes del sistema solar; allende la misma, la influencia gravitatoria de nuestro Sol es demasiado débil para capturar satélites.

Pues bien, cuando el Sol en su rotación alrededor del centro galáctico se encuentra con alguna estrella (u objeto masivo), ésta puede desestabilizar alguno de los cuerpos que forman la nube de Oort y precipitarlo hacia el sistema solar interior. Ese cuerpo atrapado puede, según su masa y composición y sobre todo sus parámetros orbitales, convertirse en un gran cometa. Entiéndanse por parámetros orbitales perigeo y perihelio, es decir, lo cerca o lejos que pasará de la Tierra y el Sol respectivamente. Con este origen es muy difícil poder averiguar cuándo aparecerá un gran



Fecha de aparición de los grandes cometas conocidos desde 1800. A cada cometa se le ha asignado un número de orden que se ha representado en el eje vertical. Las flechas verticales indican las fechas centrales de los períodos de sequía

cometa; cabe incluso plantearse si la cadencia de aparición de grandes cometas puede asociarse a un proceso caótico, campo de la ciencia cada vez más investigado.

El único conocimiento cierto que nos es dado viene de la estadística, de la extracción del promedio del número de cometas de los últimos 300 años. Por esa vía de cálculo sabemos que los grandes cometas aparecen con una periodicidad media de 10 años.

Podríamos, sin embargo, realizar un estudio más detallado de los últimos grandes cometas que nos han visitado desde 1800. En la ilustración que aportamos, hemos asignado a cada cometa un número de orden, representado en el eje vertical. Un primer análisis de la figura muestra que, estadísticamente, hemos llegado al límite de grandes cometas: 20 cometas en 200 años, de lo que deberíamos concluir que el Hale-Bopp sería el último gran cometa del siglo.

Pero analicemos los datos con mayor finura. Parece ser que los cometas no han ido surgiendo de una forma errática, sino que ha habido *períodos de sequía* cometaria y *períodos de aparición*. En la figura se han señalado, con flechas verticales, las fechas centrales de los períodos de sequía, de cuya observación se desprende que los períodos de sequía duran un promedio de unos 23 años y que actualmente nos podríamos encontrar en uno de los períodos de aparición, después de 20 años de sequía desde el paso del cometa West en 1976.

¿Cuál puede ser la causa de una periodicidad en la aparición de grandes cometas? Entre las muchas respuestas que se nos ha ocurrido, creemos que la teoría de que nuestro Sol forma parte de un sistema estelar doble quizá no sea tan descabellada: la aparición periódica de cometas podría estar relacionado con algún tipo de período orbital de una compañera de nuestro Sol.

Si esta periodicidad fuera cierta deberíamos concluir que el Hale-Bopp no sería el último gran cometa del siglo XX y que antes del fin del milenio otro gran cometa iluminaría nuestros cielos. Esperamos y deseamos que la estadística no se cumpla.

MIQUEL SERRA RICART
Observatorio del Teide.
Instituto de Astrofísica de Canarias,
La Laguna (Tenerife)

Haces de nanotubos

Producción controlada

Cuando escribimos con un lápiz u observamos un diamante en un anillo, quizá no advirtamos que el grafito del lápiz y el diamante del anillo están hechos con el mismo tipo de átomos, a saber, átomos de carbono. El grafito conduce la electricidad, es blando y es barato; por contra, el diamante es aislante, es el material más duro que existe y es costoso. Sus propiedades antagónicas resultan de la estructura dispar que forman los átomos de carbono.

El carbono, un elemento muy abundante en la naturaleza, revela una notabilísima flexibilidad para crear otras configuraciones atómicas. Pensemos, por ejemplo, en las fibras de carbono (material muy resistente para fabricar piezas de aviones y automóviles), en los fullerenos (moléculas de carbono esféricas y huecas) y los nanotubos de carbono (tubos concéntricos minúsculos que se generan al enrollar capas de grafito).

Lo mismo el grafito que el diamante y las fibras de carbono nos

son familiares. Pero, ¿qué hay de los fullerenos y los nanotubos de carbono? La razón principal de que apenas se les conozca estriba en el carácter reciente de su descubrimiento, lo que no obsta para que se hayan convertido en objeto de intensa investigación en todo el mundo, dado el interés por determinar sus propiedades y utilizarlas en el mejoramiento de nuestra vida diaria. Por el descubrimiento de los fullerenos le fue concedido el Nobel de química 1996 a Harold Kroto, de la Universidad de Sussex, que compartió con Richard Smalley y Robert Curl, de la Universidad de Rice.

El fullereno más estudiado es el carbono 60 (^{60}C). Consta de 60 átomos de carbono dispuestos en una superficie esférica que recuerda el balón de fútbol. Podemos asimilar el ^{60}C a un superátomo que está revolucionando la química, la física y la ciencia de materiales. Entre las principales líneas de investigación de los fullerenos mencionaremos el desarrollo de nuevos superconductores y nuevos polímeros. Por otra parte, se pueden generar nuevos compuestos al introducir átomos en el interior de la cavidad del ^{60}C. En medicina se recurre al ^{60}C para inhibir ciertas enzimas relacionadas con el sida.

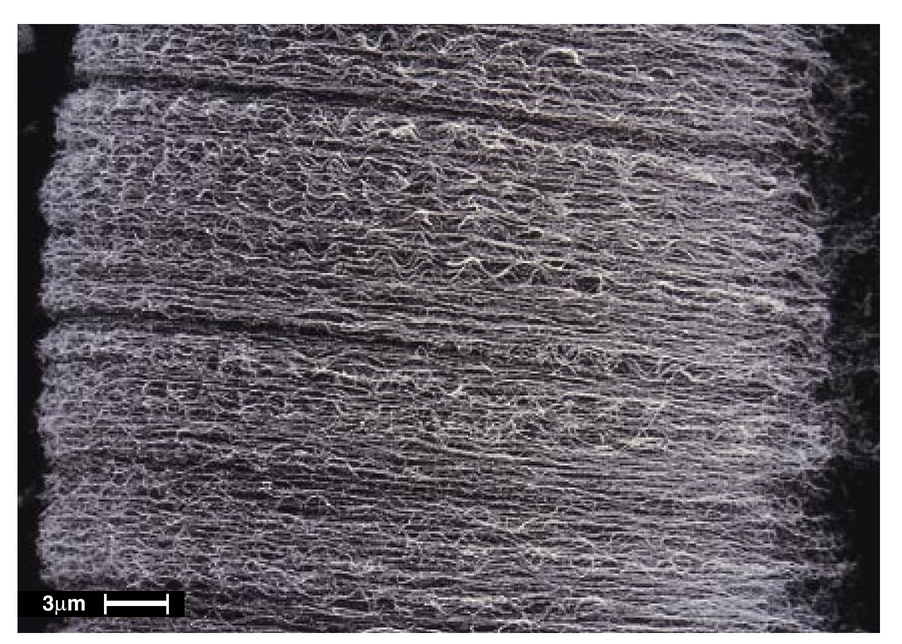
Los nanotubos presentan, a su vez, un prometedor futuro en ingeniería de conductores y semiconductores para dispositivos electrónicos microscópicos, en conductores cuánticos, en materiales de alta resistencia, en nuevos monitores de vídeo ultrafinos, en catálisis, etcétera. Si hasta ahora las aplicaciones de los nanotubos no han salido del laboratorio de ensayos, ello se debe a problemas de escala: las cantidades que se obtienen son insignificantes.

Así estaban las cosas cuando apareció el año pasado un artículo en *Nature*, donde se describía cómo obtener nanotubos de carbono alineados en cantidades suficientes para hacer experimentos que nos permitan producir nuevos materiales para el futuro. En la confección del escrito intervinieron el grupo de Kroto, de la Universidad de Sussex, la Universidad de California en Santa Barbara y el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Disponemos de tres métodos para obtener nanotubos de carbono: por medio de un plasma generado por un arco eléctrico de barras de grafito, por pirólisis y por electrólisis.

Mediante el método de arco eléctrico se producen nanotubos con capas atómicas muy ordenadas, debido a las altas temperaturas de aproximadamente 3600 grados centígrados, con longitudes de hasta 20 micrometros y diámetros desde 20 hasta 300 angstrom; no puede evitarse la generación de partículas grafíticas, impureza que obliga a purificar la muestra, con la pérdida consiguiente del 90 por ciento del material inicial. Una vez que se tiene estos nanotubos purificados, los diámetros y las longitudes son muy variables. Lo anterior nos pone en la difícil y casi imposible tarea de seleccionar los nanotubos uno a uno para reunir los que ofrecen características similares y generar un material con propiedades coherentes.

El método de pirólisis consiste en calentar (de 700 a 950 grados centígrados) un hidrocarburo (benceno, acetileno, etcétera) en presencia de un catalizador; por tal podemos emplear



Micrografía electrónica de barrido en donde se muestra los haces de los nanotubos de carbono alineados

níquel, cobalto o hierro. Se forman nanotubos dotados de similares características en longitud y diámetros de hasta 100 nanómetros, aunque no resultan tan perfectos como los de arco eléctrico. Los nanotubos "pirolíticos" presentan en las puntas una partícula del metal catalizador que les ayudó a crecer. Al igual que en el método de arco eléctrico, en el procedimiento pirolítico las dimensiones son muy variables y se generan una gran cantidad de agregados grafíticos indeseables, por cuyo motivo también hay que purificar.

Finalmente, el método de electrólisis consiste en usar una sal fundida de cloruro de litio a 750 grados centígrados con dos electrodos de grafito en su interior y hacer pasar una corriente eléctrica. El material que se obtiene a través de este procedimiento es muy similar al obtenido con pirólisis y con las mismas desventajas.

En el nuevo método que proponemos se usa pirólisis de un hidrocarburo sólido (2-amino-4, 6-dichloro-s-triazina) sobre una película delgada de cobalto. Con un láser de alta potencia se formó en la lámina un patrón de líneas; se descubrió que los nanotubos alineados en haces de igual longitud (hasta 50 micrometros) y diámetros uniformes (de 30 a 50 nanómetros) crecían a lo largo de las líneas generadas por el láser sin que se produjeran impurezas (*véase la figura*). Las cantidades de material son tales, que podemos percibir a simple vista los haces de los nanotubos.

La originalidad de nuestro procedimiento estriba en el uso de un rayo láser que, al incidir sobre la película de cobalto, produce partículas pequeñas —de menos de 50 nanómetros— de este elemento, distribuidas uniformemente, lo que hace que el carbono pueda usarlas para hacer crecer nanotubos alineados.

Son múltiples las ventajas que se desprenden del empleo de nuestro método. Se abre la posibilidad de llevarlo a gran escala y obtener nanotubos en cantidades importantes sin impurezas. Alrededor del 20 al 30 % de los nanotubos obtenidos son conductores que presentan idéntica configuración estructural. Las longitudes de hasta 50 micrometros son apropiadas para hacer mediciones. Sobre todo, se pueden colocar los nanotubos selectivamente en donde se hace incidir el láser. En cierto modo, constituye un método para *sembrar* nanotubos. Más aún, esta nueva técnica de crecimiento puede aplicarse en la síntesis de nanotubos de nitruro de boro. No habrá de pasar mucho tiempo antes de que los nanotubos y los fullerenos formen parte de nuestra vida diaria y nos resulten tan familiares como el grafito y el diamante.

HUMBERTO TERRONES
Instituto de Física,
Universidad Nacional Autónoma
México

Lucha contra las infecciones

El ciclo de la malaria en los mosquitos

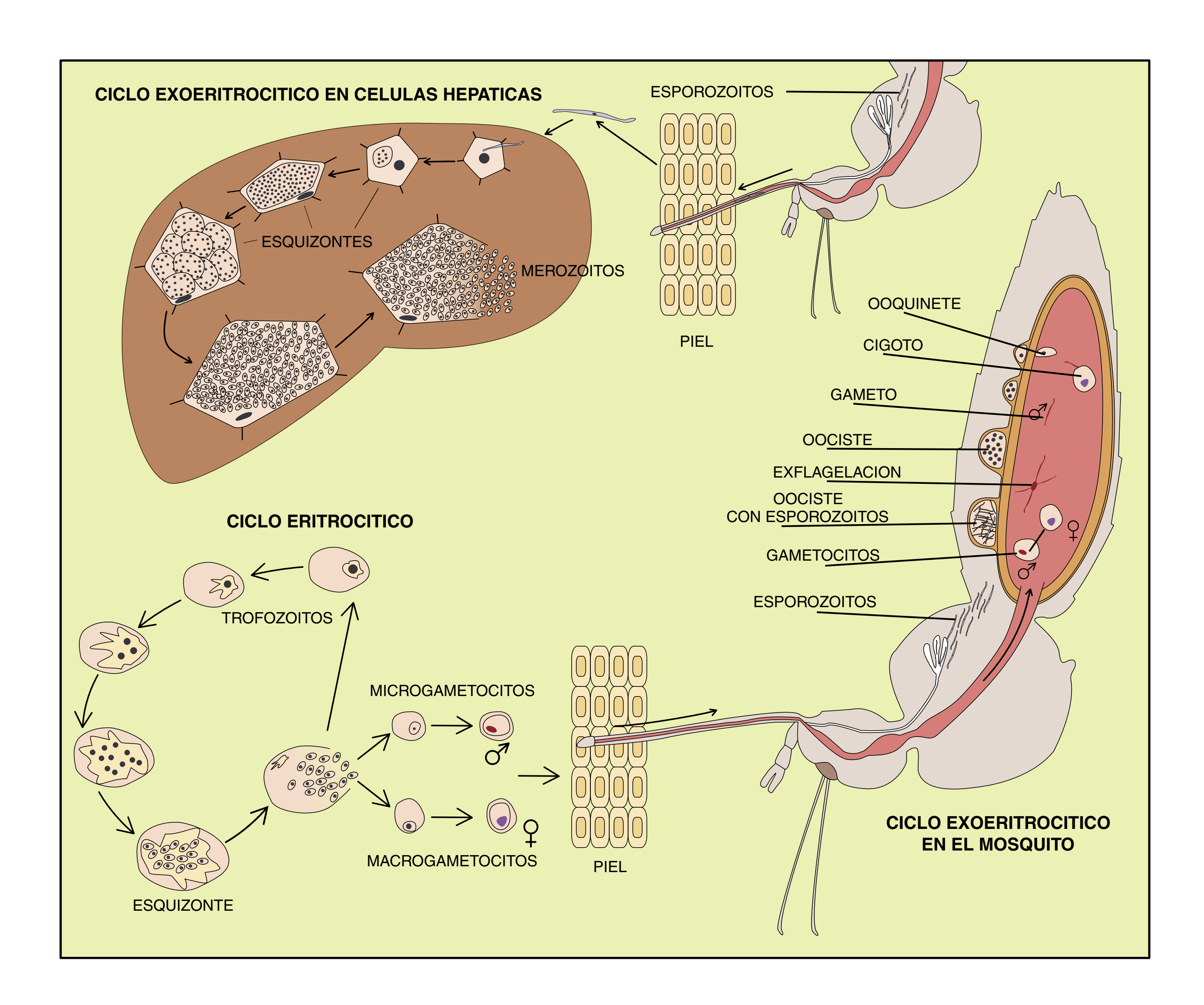
Hace más de un siglo Alphonse Laveran y Sir Ronald Ross descubrieron que la malaria, una de las enfermedades infecciosas más devastadoras, la causaba un protozoo y la transmitían los mosquitos. *Plasmodium falciparum*, uno de los agentes etiológicos de la malaria humana y responsable de cientos de millones de infecciones clínicas, mata de uno a tres millones de personas al año.

La diseminación y aumento de la resistencia del parásito a drogas antimaláricas, el desarrollo de resistencia del vector *Anopheles* a insecticidas, la inadecuada infraestructura para el control de la enfermedad y la migración de personas no inmunes a territorios contaminados, contribuyen a la persistencia y, en muchos casos, a la propagación mundial de la enfermedad.

El complejo ciclo de vida del parásito comienza cuando los mosquitos infectados inoculan esporozoitos (células haploides del protozoo) en el espacio extracelular, en el sistema circulatorio del huésped o en ambos (*véase la figura*). Algunos esporozoitos que alcanzan el torrente sanguíneo se dirigen al hígado e infectan las células hepáticas. Allí, un esporozoito se desarrolla entre 2 y 10 días, según la especie de *Plasmodium*, y se forma un esquizonte intrahepático (ciclo exoeritrocítico en células hepáticas).

El hepatocito infectado se rompe y libera alrededor de 30.000 merozoitos, cada uno de los cuales puede invadir a un eritrocito (ciclo eritrocítico). El parásito se desarrolla dentro del eritrocito en un intervalo de 2 a 3 días; resulta un esquizonte intraeritrocítico que posee entre 10 y 30 merozoitos. Cada merozoito puede infectar a un nuevo eritrocito y generar una enfermedad aguda con consecuencias que pueden ser fatales, especialmente si se trata de *P. falciparum*.

Paralelamente, el merozoito puede desarrollar, dentro del eritrocito, un estado sexual llamado gametocito. Cuando un mosquito ingiere eritrocitos que contienen gametocitos, éstos son liberados en su forma masculina y femenina en el tracto intestinal del



mosquito. La fecundación conduce al estado de cigoto, ooquinete, oociste y, luego de un breve proceso meiótico, al estado de esporozoitos (ciclo exoeritrocítico en el mosquito). Estos, una vez maduros, alcanzan la glándula salival del mosquito, prestos para ser inoculados en un nuevo huésped.

El viaje de los esporozoitos desde la glándula salival del mosquito al hígado del huésped constituye una de las partes peor conocidas del ciclo del parásito. Aunque las células hepáticas presentan receptores proteoglicanos de heparán sulfato para una región de la proteína circumporozoítica (CS) y para la proteína anónima relacionada con trombospondina (TRAP), no se sabe si éste es el mecanismo en cuya virtud los esporozoitos quedan secuestrados por el hígado.

Los esporozoitos podrían interactuar inicialmente con las células de Kuffer o células endoteliales que recubren los sinusoides hepáticos, antes de llegar a la célula hepática. Esta hipótesis, sin embargo, carece de suficiente aval. De acuerdo con otra hipótesis alternativa, los esporozoitos invaden directamente las células hepáticas. Esta hipótesis se ha visto respaldada por ensayos de unión de péptidos y proteínas recombinantes de CS y TRAP a células hepáticas en cultivos, por estudios de tejidos hepáticos con microscopía electrónica después de la inyección de esporozoitos y por secuestro en el hígado de péptidos de CS marcado con iodo radiactivo (^{125}I) en ratones inoculados.

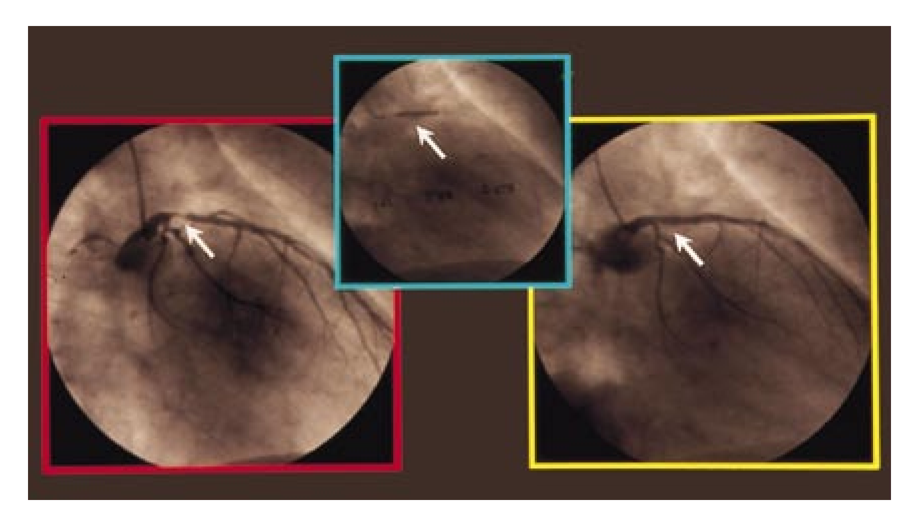
Se han desarrollado estrategias inmunitarias para obtener vacunas contra proteínas presentes en los diferentes estados de ciclo del parásito. Varias vacunas basadas en la proteína circumporozoítica, que encontramos en la superficie del esporozoito, generan altos títulos de anticuerpos en la mayoría de los individuos y protegen parcialmente a individuos que sufren una infección natural o experimental. En los esfuerzos por inducir respuesta de tipo celular (CD4 y CD8) contra proteínas de estados intrahepáticos (CS, TRAP/SSP2, LSA-1, etc.) y eritrocíticos (MSP-1, MSP-2, SERA, etc.) se han logrado resultados prometedores en algunos modelos animales, aunque no todas se han ensayado en humanos. La estrategia preferida en los próximos años insistirá en el desarrollo de vacunas sintéticas multiantigénicas que posean antígenos de los diferentes estados del parásito y que generen una respuesta de tipo humoral y celular.

Mediante la técnica de objetivos génicos ("gene targeting") se han creado líneas parasitarias de *Plasmodium berghei* knock out para los genes que determinan las proteínas CS y TRAP. La línea parasitaria "knock out" para CS es incapaz de generar esporozoitos; la línea "knock out" para TRAP, con una drástica disminución

en la infectividad y en el porcentaje de invasión de la glándula salival, presenta alteraciones en la motilidad de los esporozoitos.

El conocimiento de los principales componentes moleculares del desarrollo, motilidad e invasividad del parásito abren la posibilidad de nuevos enfoques quimioteraupéuticos e inmunitarios para controlar la infección de protozoos causantes de la malaria.

CLAUDIO CORTÉS
Departamento de Parasitología Médica y Molecular
Hospital Clínico Universitario de Nueva York



1. Procedimiento de dilatación mediante catéter balón de una lesión situada en el segmento proximal de la arteria coronaria descendente anterior en un paciente con cardiopatía isquémica. Es un ejemplo de angioplastia coronaria. Las flechas indican la estrechez de la arteria y su evolución tras la dilatación. El panel izquierdo recoge la situación basal; el central nos muestra el catéter balón inflado durante el proceso de dilatación. Por fin, el panel derecho revela el resultado tras la dilatación

Cirugía coronaria

Desde el interior de las arterias

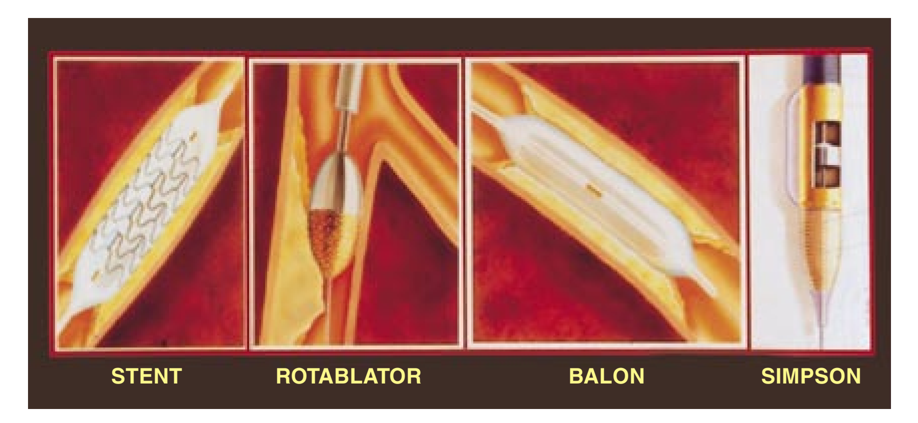
El 16 de septiembre de 1977, Andreas Grüentzig ponía en Zurich la primera piedra de lo que serían las técnicas basadas en el uso de catéteres para tratamiento no quirúrgico de pacientes con cardiopatía isquémica. Se caracteriza ésta por la aportación insuficiente de sangre debido a estenosis u oclusión de un vaso, con la consiguiente alteración de la función cardíaca.

La idea de crear un catéter con un balón situado en el extremo distal (*figura 1*) que posibilitaba la dilatación y, por tanto, la eliminación de lesiones del interior de las arterias coronarias, cambió el panorama terapéutico de la cardiopatía isquémica. El nuevo tratamiento por angioplastia coronaria se sumaba a las dos opciones entonces existentes, a saber, administración de fármacos o cirugía de injerto aorto-coronario.

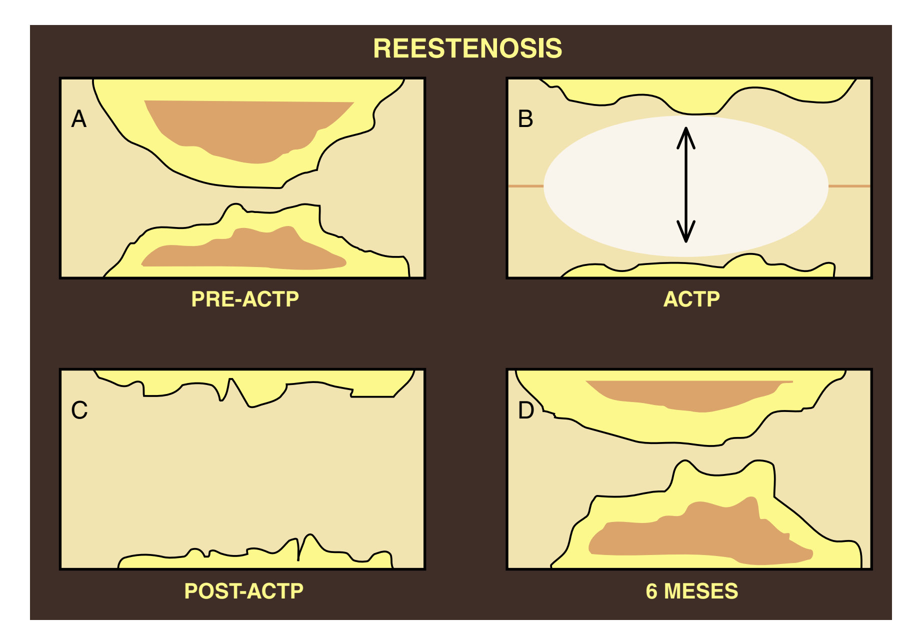
Del desarrollo espectacular de dicha técnica nos hablan las cifras. En 1980 se realizaron en España dos procedimientos de angioplastia coronaria; diez años después se practicaron 12.359. En el resto del mundo esta evolución ha sido paralela, con una cifra en torno al millón de procedimientos de angioplastia coronaria realizados en 1997, aproximadamente el doble de las intervenciones de cirugía coronaria.

La mejora de las técnicas y de los materiales ha permitido generalizar esta técnica. Se aplica a pacientes con angina estable, con angina inestable y con infarto agudo de miocardio. Desde el punto de vista anatómico, se tratan no sólo las lesiones de morfología favorable (cortas, concéntricas, en segmentos rectos, en vasos proximales), sino también las de morfología desfavorable (lesiones largas, distales, en angulación, en bifurcación de ramos colaterales, oclusiones totales, lesiones calcificadas, lesiones complejas, situadas en arterias nativas, en injertos de vena safena o en injertos de arteria mamaria), con unas tasas de éxito superiores a 90 % y con una frecuencia de complicaciones mínimas, de alrededor del 3 %.

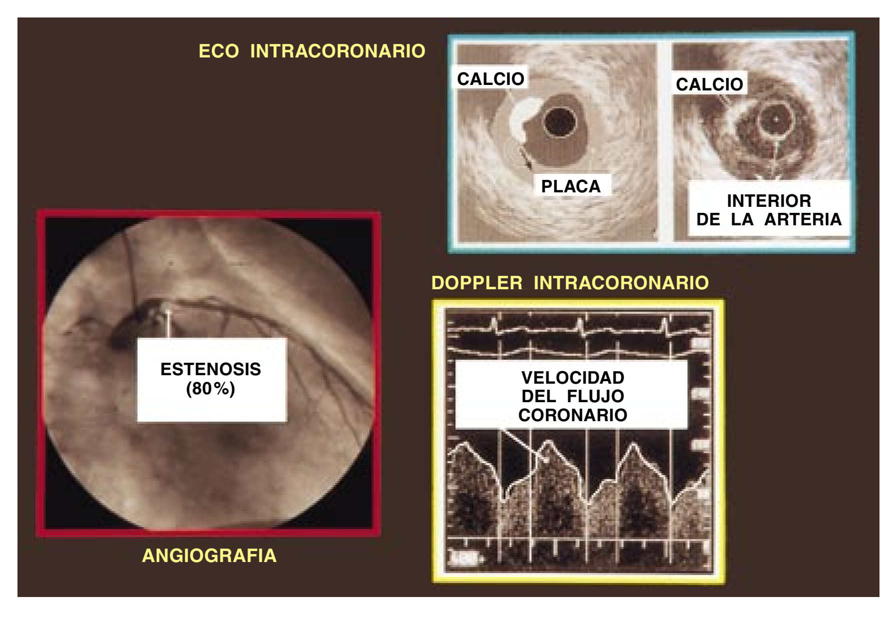
Esta nueva técnica requirió en sus inicios la seguridad de una cobertura quirúrgica ante posibles complicaciones. A ésta hubo que recurrir,



2. Imágenes de los distintos tipos de dispositivo utilizado en el procedo de dilatación de lesiones coronarias. En el panel lateral izquierdo se ilustra una prótesis intracoronaria que se implanta al inflar el balón dentro de una arteria coronaria para tratar la estenosis existente en ese segmento. El panel central izquierdo muestra un aterotomo de rotación abrasión que gira a unas 180.000 rpm y que pulveriza la placa eliminando la estrechez. Vemos en el panel central derecho un catéter balón dentro de una arteria coronaria inflado para tratar la estenosis existente en ese segmento. Se distingue en el panel lateral derecho un aterotomo de corte y extracción, que se puede orientar hacia donde está la estenosis y cortarla selectivamente, eliminando con ello la placa que dificulta el riego normal en esa arteria



3. Esquema del proceso de reestenosis. Se parte del esquema de la placa que estrecha el interior de una arteria (panel A). *Se procede entonces a la dilatación y eliminación de la placa mediante un catéter balón* (panel B). *El resultado operado tras la dilatación de la placa con el catéter balón se aprecia en el panel* C. *Por último, el panel* D *nos recuerda un episodio de reestenosis: la estrechez se ha vuelto a presentar en el transcurso de los 6 siguientes meses al momento de la dilatación*



4. Técnicas de imagen merced a las cuales nos formamos un juicio mejor fundado de la severidad, morfología y repercusión funcional de una estrechez situada en una arteria coronaria. En el panel inferior izquierdo encontramos una imagen de la severidad de la estrechez obtenida con la angiografía coronaria; en el superior derecho, una imagen del interior de la arteria coronaria y de la severidad y composición de la placa que estrecha su luz, obtenido mediante una sonda de ecografía intravascular por ultrasonidos de alta frecuencia. Se nos ofrece en el panel inferior derecho una imagen de la velocidad y cantidad de flujo coronario que permite la estrechez coronaria, provocado mediante una sonda de ultrasonidos por efecto doppler

de hecho, en el 10 % de los casos. Ese porcentaje ha caído ahora a menos del 0,5 %. En ese progreso ha influido la aparición de nuevos dispositivos.

Dentro de estos dispositivos, resaltaremos dos tipos: los aterotomos y las prótesis intracoronarias. Estas prótesis han contribuido a solucionar la oclusión aguda del vaso y el fenómeno de la reestenosis, las dos complicaciones graves que tenia pendientes la angioplastia con balón.

La oclusión aguda del vaso se producía entre el 2 % y el 12 % de los casos. En casi la mitad de los pacientes conducía a un infarto de miocardio, con un desenlace fatal a veces o necesidad de cirugía urgente. Pues bien, las prótesis intracoronarias han permitido reducir al mínimo este problema; tras una implantación de prótesis intracoronaria, sólo se requiere cirugía urgente en un 0,5 % de los casos, las tasas de infarto no llegan al 4 % y la mortalidad es de alrededor del 1 %.

Vayamos a la reestenosis. Tras la dilatación inicial con catéter balón de una estrechez coronaria, comienza un proceso de reparación del daño. En el 30 % de los casos puede darse una nueva estrechez (reestenosis) en el segmento coronario dilatado (*figura 3*). Lo que significa que tornan a presentarse los síntomas y que vuelve a necesitarse angioplastia o cirugía. La implantación de prótesis intracoronarias sí ha rebajado a la mitad la incidencia de reestenosis.

La evolución técnica se dirige hacia dos objetivos. En primer lugar, se trata de incorporar nuevos medios para evaluar con mayor finura la enfermedad, las características y la composición de la placa que obstruye la arteria, así como la repercusión fisiológica de dicha estrechez. Los datos obtenidos a través de la ecografía intravascular y la técnica de medición de flujo intracoronario con guías doppler o guías de presión orientan sobre el tratamiento más adecuado a cada lesión (*figura 4*).

En segundo lugar, se busca controlar el fenómeno de reestenosis, que, no obstante los avances, se sigue produciendo en el 15 %-20 % de casos. La vía escogida es la liberación de fármacos, proteínas o moléculas en el segmento arterial tratado. También se ensaya con la aplicaciones de radiaciones con efecto local.

Mientras tanto, la enfermedad sigue ahí. Sólo mediante las adecuadas medidas de prevención y de educación sanitaria, que eviten los "factores de riesgo coronario" (hipertensión arterial, hipercolesterolemia, diabetes, hábito de fumar), se podrá reducir el impacto que esta enfermedad tiene sobre la población y sobre la sociedad en su conjunto.

ANDRÉS IÑIGUEZ ROMO
Jefe Unidad Hemodinámica y Cardiología Intervencionista
Fundación Jiménez Díaz, Madrid

Mariposas migratorias

De la brújula solar a la geomagnética

Año tras año, llegado el otoño, las mariposas monarcas (*Danaus plexippus*) abandonan su región de cría, en el oriente de Estados Unidos y Canadá, y recorren 4000 kilómetros hasta llegar a sus zonas de invernada en México.

Esos lepidópteros se sirven de una brújula solar para orientarse durante el viaje migratorio. Nos propusimos someter a prueba esa afirmación. Para ello, retrasamos sus ritmos circadianos en el laboratorio. Luego soltamos las mariposas y observamos su orientación del vuelo. Las mariposas de ritmo retrasado cambiaron sus ángulos de orientación; no así las mariposas control del laboratorio sin retrasar, ni las mariposas que vagaban libres por el campo. La investigación nos demostró, en efecto, que las mariposas monarcas están capacitadas para reorientar su vuelo a lo largo del continente sirviéndose de una brújula solar.

Con un conocimiento aproximado de la hora del día, muchos animales se apoyan en el cambiante azimut del sol para orientar sus movimientos locales y migratorios. K. Schmidt-Koenig en 1958 y más recientemente otros investigadores han demostrado, mediante la alteración de las horas expuestas a la luz y las horas de obscuridad (el ritmo circadiano), que ciertos animales recurren a la brújula solar.

A consecuencia de esa manipulación del ritmo endógeno, los animales yerran en su interpretación de la posición del sol y cambian, de una forma predecible, la dirección del movimiento migratorio. En el hemisferio norte, por ejemplo, las especies migratorias sometidas a un retraso provocado de su ritmo endógeno modifican su orientación a la manera de las agujas del reloj.

Era septiembre del año 1996. En el laboratorio de nuestro departamento de entomología de la Universidad de Kansas retrasamos seis horas el ritmo endógeno de las monarcas migratorias. Nos proponíamos determinar si las mariposas empleaban una brújula solar que compensara ese desfase horario. Soltamos las mariposas manipuladas. Sometimos a seguimiento cada lepidóptero, con controles de uno a cinco minutos. Con brújulas de mano, corrimos detrás y debajo de las mariposas y medimos la orientación del eje corporal mantenida durante 15 segundos por lo menos. Otras mariposas migratorias mantenidas en el laboratorio sin alterarles el ritmo endógeno sirvieron de control simulado; para cumplir la función de control natural contábamos con las mariposas del campo.

La orientación promedio de las mariposas con cambio de ritmo endógeno seguía una dirección oeste-noroeste (*véase la figura, a*). Esta orientación difiere en 75 grados de la orientación promedio (sur-suroeste) de las mariposas del control simulado (*figura, b*) y difiere en 85 grados de la orientación media de las mariposas del campo (*figura, c*). La orientación promedio de las mariposas manipuladas cambió en la dirección de las agujas del reloj, de acuerdo con lo previsto.

La cuantía del cambio de las mariposas manipuladas fue también el esperado cuando se realiza un retraso de tiempo de seis horas. Es notable que los dos grupos de control exhibieron medias de orientación sorprendentemente similares, señal de que el cautiverio no influyó de manera especial.

Las mariposas monarcas de América del Norte se apoyan en la brújula solar durante su migración de otoño. Se basan en la hora del día y la posición del sol para mantener un ángulo de orientación y un rumbo al sur. Más aún. Pese a la falta de señales en el firmamento, en días nublados por ejemplo, las monarcas continúan orientándose en dirección sur-suroeste. De donde se infiere que esos lepidópteros poseen también otro mecanismo de orientación, quizá una brújula geomagnética.

Orientación del eje corporal de (a) *las mariposas de ritmo retrasado (*$\mu = 287^o$*; r = 0,29; n = 43; cada círculo representa una mariposa). En el centro* (b)*, orientación promedio de las mariposas de control simulado (*$\mu = 211^o$*; r = 0,67; n = 25; cada círculo representa una mariposa); a la derecha* (c)*, orientación promedio de las mariposas del campo (*$\mu = 200^o$*; r = 0,86; n = 204; cada círculo representa 3 mariposas). De las 532 mariposas migratorias observadas, 272 aportaron datos de orientación estables*

SANDRA M. PEREZ
Departamento de Ecología y Biología Evolutiva
Universidad de Arizona
ORLEY R. TAYLOR y RUDOLF JANDER
Departamento de Entomología
Universidad de Kansas

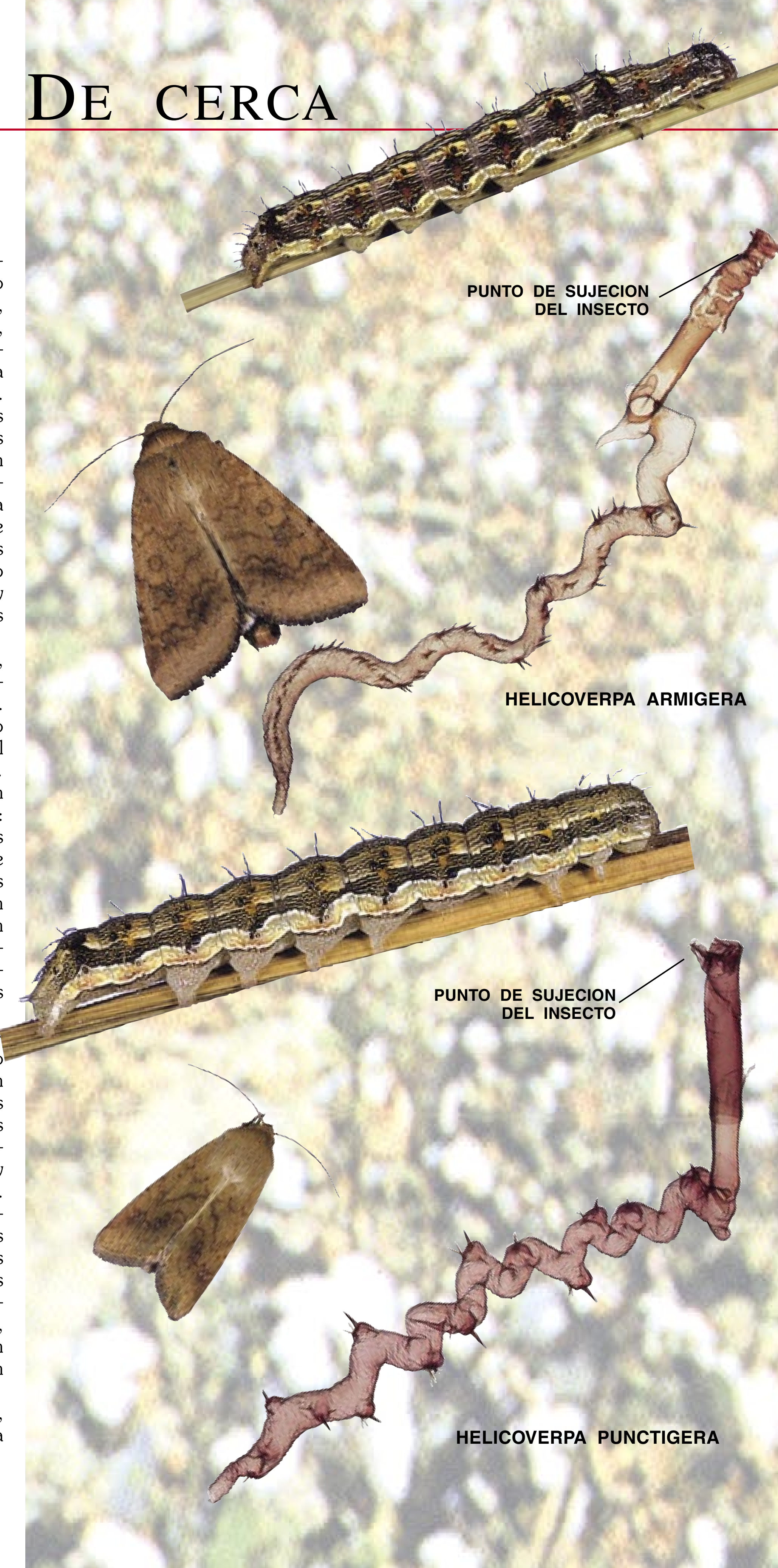
Discriminación sexual

Helicoverpa armigera, un lepidóptero, es un parásito de numerosos cultivos, que van desde el algodón a la alfalfa, sin olvidar los tomates. En Australia, *H. armigera* coexiste con una especie endémica, *H. punctigera*. Estos dos insectos hacen estragos en las plantaciones de algodón. Las poblaciones de *armigera*, que moran todo el año en las zonas de cultivo, han desarrollado resistencia a los insecticidas. Las poblaciones de *punctigera*, en cambio, procedentes de las regiones secas del centro del país, se renuevan cada año y son más sensibles a los productos químicos.

Para adaptar la lucha al agresor, los cultivadores han de distinguir ambas especies con rapidez y certeza. A pesar de su gran semejanza, tanto en el estado larvario como en el adulto, *H. armigera* (*arriba*) y *H. punctigera* (*abajo*) se diferencian por una peculiaridad física esencial: la forma de los órganos genitales de los machos. Al ser físicamente imposible el acoplamiento de dos de estos insectos, la diferenciación morfológica se suma a la definición biológica de especie: dos poblaciones que no pueden tener descendencia común fértil constituyen dos especies distintas.

Para la observación al microscopio de los genitales de un insecto es preciso que éstos mantengan su forma. Para prepararlos se les inyecta alcohol a presión en los tejidos mediante una jeringa hipodérmica; quedan así deshidratados y endurecidos sin sufrir deformación. Para ello, se mantiene el espécimen sobre la jeringa mediante unas pinzas diminutas perforadas en sus extremos. Se han adaptado pinzas de diferentes tamaños a distintos grupos de insectos; este instrumento, llamado "falobomba", resulta de un valor precioso para la clasificación filogenética de los insectos.

MARCUS MATTHEWS,
CISRO, Canberra



El desorden de hiperactividad y déficit de atención

Se trata de un trastorno del autocontrol, cuyo origen podría hallarse en la alteración de uno o de varios genes responsables del desarrollo de ciertos circuitos cerebrales

Russell A. Barkley

Observando a Pedrín, de cinco años, en la sala de espera de mi consultorio, comprendí por qué decían sus padres que en el parvulario le iba tan mal. Saltaba de un sillón a otro, agitaba los brazos, jugaba con los interruptores de la luz, encendiéndolos y apagándolos, molestando a todos, mientras parloteaba sin parar. Cuando su madre le animó a que se uniese a un grupo de otros niños que se entretenían en el cuarto de los juguetes, Pedrín quiso intervenir en un juego muy adelantado, con la consiguiente repulsa de los demás, que prefirieron dedicarse a otra cosa. Solo, y con unos cuantos juguetes, los disponía sin orden ni concierto y los trataba a batacazos. Parecía incapaz de entretenerse con tranquilidad. Así que le hube examinado más por completo, me confirmé en mis sospechas iniciales: el chico padecía el desorden de hiperactividad y atención deficiente (DHAD).

Desde los años cuarenta los psiquiatras han diagnosticado de distintos modos a los niños que son desmesuradamente hiperactivos, dispersos e impulsivos. Se ha hablado de "disfunción cerebral mínima", "síndrome infantil de lesión cerebral", "reacción hipercinética de la infancia", "síndrome del niño hiperactivo" y, más recientemente, "desorden del déficit de atención". Los cambios de denominación frecuentes reflejan la inseguridad de los investigadores ante las causas subyacentes e incluso ante los criterios precisos para diagnosticar el trastorno.

En los últimos años, sin embargo, ha empezado a entrar cierta luz en el campo de sus síntomas y causas. Creemos que podría tener un origen genético. La opinión actual sobre cuál sea la base del trastorno difiere bastante de la mantenida años atrás. El DHAD no sería de suyo un desorden de la atención, tesis defendida antaño. Surgiría, por contra, de un fallo en el desarrollo de los circuitos cerebrales en que se apoyan la inhibición y el autocontrol. La pérdida de autocontrol menoscabaría, a su vez, otras funciones cerebrales que revisten importancia crucial para el mantenimiento de la atención, entre ellas las que capacitan para demorar las recompensas inmediatas y así obtener, más tarde, una ganancia mayor.

En el DHAD se dan dos conjuntos de síntomas: falta de atención y una



combinación de comportamientos hiperactivos e impulsivos. La mayoría de los niños son más activos, distraídos e impulsivos que los adultos. Y son también más inconstantes, sensibles a eventos momentáneos y dominados por los objetos de su entorno inmediato. Cuanto más pequeños, menos capaces son de notar el paso del tiempo o de dar prioridad a sucesos del futuro sobre los deseos y necesidades inmediatos. Pero tales comportamientos sólo entrañan un problema cuando los niños los manifiestan en una medida significativamente mayor que el común de sus iguales.

Las probabilidades de desarrollo de este desorden en los niños triplican de lejos las de las niñas. Según algunos estudios los niños con DHAD superarían incluso en la proporción de nueve a uno a las niñas afectadas, por la razón presumible de que los varones presentan una mayor propensión genética a los trastornos del sistema nervioso. Las pautas de comportamiento típicas del DHAD empiezan a manifestarse entre los tres y los cinco años. Con todo, la edad del comienzo puede variar mucho: algunos no muestran los síntomas hasta el final de la infancia o incluso hasta el inicio de la adolescencia. Se ignora por qué se retrasan los síntomas del trastorno.

Los afectados por este desorden son muchísimos. Abundan los trabajos que cifran su incidencia entre el 2 y el 9,5 % de los niños en edad escolar. Se ha encontrado en cuantos países y culturas han sido objeto de su estudio. Más aún, el trastorno, que en tiempos se pensó que remitía con la edad, puede persistir en la adultez. Unos dos tercios de los 158 chicos con DHAD que mis colegas y yo diagnosticamos en los años setenta seguían padeciendo el trastorno siendo ya veinteañeros. Y muchos de los que no encajaron del todo en la descripción clínica del DHAD tenían aún importantes problemas de adaptación en el trabajo, en los estudios o en otros ámbitos sociales.

Para ayudar a los niños (y a los adultos) que padecen el DHAD, psiquiatras y psicólogos han de conocer mejor las causas del desorden. Acostumbrados a considerar el DHAD un problema de atención, han sugerido algunos que su origen estaría en una incapacidad del cerebro para filtrar información sensorial antagonista, verbigracia, imágenes visuales y sonidos. Pero recientemente un equipo dirigido por Joseph A. Sergeant, de la Universidad de Amsterdam, ha demostrado que los niños con DHAD no tienen ninguna dificultad en ese campo; en cambio, no pueden inhibir sus impulsivas respuestas motoras ante tal información. Otros expertos han puesto en claro que los niños con DHAD son menos capaces de preparar respuestas motoras de anticipación ante los eventos y se muestran insensibles a la retroalimentación sobre los errores cometidos en esas respuestas. Por ejemplo, en el test del tiempo de reacción, los niños con DHAD evidencian una presteza menor a la hora de apretar una tecla, entre varias, al ver una luz de aviso. Y habiendo cometido errores en el test, tampoco reflexionan para mejorar la puntuación.

1. LOS NIÑOS CON DHAD no pueden controlar las respuestas a su entorno. Esta falta de control les hace ser hiperactivos, dispersos e impulsivos.

Se desconocen las causas directas e inmediatas de las dificultades que experimentan los niños afectados de DHAD. Los avances en la técnica de formación de imágenes y en genética parecen augurar que esta cuestión quedará resuelta de aquí a cinco años. Ya se han descifrado algunas claves, pero todavía no se las ha podido conjuntar en un cuadro coherente.

De acuerdo con la investigación acometida en los últimos 10 años mediante técnicas de formación de imágenes, podría darse un malfuncionamiento de ciertas regiones del cerebro, lo que explicaría los síntomas del trastorno. Se sugiere la implicación del córtex prefrontal, una parte del cerebelo y los ganglios basales. En un estudio de 1996 F. Xavier Castellanos, Judith L. Rapoport y sus colegas, del Instituto Nacional de la Salud Mental, comprobaron que el córtex prefrontal derecho y dos ganglios basales (*nucleus caudatus* y *globus pallidus*) eran notoriamente menores de lo normal en los niños con DHAD. A comienzos de este año, el equipo de Castellanos halló que la región vermis del cerebelo es también más pequeña en dichos pacientes.

Los hallazgos obtenidos a través de la técnica de formación de imágenes encajan. En efecto, las áreas del cerebro que en el desorden se muestran encogidas, son precisamente las mismas que regulan la atención. Así, por ejemplo, el córtex prefrontal derecho interviene en la "edición" de la conducta del individuo, resistiendo a las distracciones y desarrollando una conciencia de la propia entidad y del tiempo. El *nucleus caudatus* y el *globus pallidus* contribuyen a desconectar las respuestas automáticas, posibilitando que el córtex delibere con más detenimiento y que se coordinen entre las diversas regiones del córtex las informaciones neurológicas. No está claro el papel que desempeña el vermis cerebeloso; en estudios provisionales se habla de una posible intervención en regular la motivación.

¿A qué se debe el que estas estructuras se encojan en los cerebros de quienes tienen DHAD? Se ignora. Lo que no obsta para que ciertos trabajos sugieran que podrían guardar relación con ello las mutaciones de varios genes que, en condiciones de normalidad, son muy activos en el córtex prefrontal y en los ganglios basales. La mayoría de los investigadores creen hoy que nos hallamos ante un trastorno poligénico, vale decir, donde participa más de un gen.

Las indicaciones de que al DHAD subyacen fallos genéticos nos llegan del entorno familiar. Así, la probabilidad de que el síndrome se desarrolle en los hermanos de niños con DHAD multiplica de cinco a siete veces la probabilidad de que aparezca en niños de familias no afectadas. Los hijos de un progenitor con DHAD tienen hasta un 50 % de posibilidades de experimentar las mismas dificultades.

Pero la prueba más concluyente de la participación genética en el DHAD nos la ofrece la investigación sobre hermanos gemelos. En 1992 el grupo encabezado por Jacquelyn J. Gillis, entonces en la Universidad de Colorado, daba cuenta de que el riesgo de DHAD para un niño cuyo gemelo idéntico lo sufriera era entre 11 y 18 veces mayor que el del hermano no gemelo; de acuerdo con sus datos, entre el 55 y el 92 % de

RUSSELL A. BARKLEY dirige la sección de psicología del hospital clínico de la Universidad de Massachusetts en Worcester, donde enseña psiquiatría y neurología. Desde hace unos 25 años viene estudiando el trastorno al que ha dedicado artículos y libros; entre ellos, *ADHD and the Nature of Self-Control* y *Attention-Deficit Hyperactivity Disorder: A Handbook for Diagnosis and Treatment*.

Diagnosis del DHAD

Los psiquiatras diagnostican el desorden de hiperactividad y déficit de atención (DHAD) si el individuo manifiesta seis o más de los siguientes síntomas de falta de atención o seis o más síntomas de hiperactividad e impulsividad. Las manifestaciones de tales síntomas han de ser frecuentes, darse dentro de un período de por lo menos seis meses y en un grado que suponga inadaptación y desproporción con el nivel de desarrollo de la persona. Además, algunos de los síntomas deberán haber causado deterioro antes de los siete años de edad y estar causándolo actualmente en dos o más de esos aspectos. Algunos habrán de ir también derivando hacia un grave deterioro del desenvolvimiento social, académico u ocupacional del sujeto. (Adaptado con permiso de la cuarta edición del *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* ©1994 American Psychiatric Association.)

FALTA DE ATENCION

- No atiende a los detalles y comete errores por falta de esmero en las tareas escolares, en el trabajo o en otras actividades.
- Le cuesta mucho mantener la atención en los trabajos o en las actividades lúdicas.
- Parece no escuchar cuando se le habla.
- Nunca sigue las instrucciones que se le dan, deja inconclusas las tareas y no cumple sus deberes en la escuela o en el trabajo.
- Se le hace difícil organizar tareas y actividades.
- Le disgusta comprometerse en algo que requiera un esfuerzo mental continuado (por ejemplo, las tareas escolares) y lo evita o rehúye.
- Pierde cosas necesarias para sus tareas o actividades (juguetes, libretas o cuadernos escolares, lapiceros, libros o herramientas).
- Le distraen fácilmente los estímulos externos.
- Es olvidadizo en sus actividades cotidianas.

HIPERACTIVIDAD E IMPULSIVIDAD

- Agita nerviosamente las manos o los pies, o se retuerce en el asiento.
- Se levanta a cada momento en clase o en otras situaciones en las que debería permanecer sentado.
- Corretea incesantemente o trata de subirse a cualquier eminencia cuando resulta inapropiado hacerlo (si se trata de adolescentes o adultos, sentimientos subjetivos de no poder estarse quieto).
- Le es difícil jugar o participar en pasatiempos tranquilamente.
- Está siempre “a toda marcha”, como si fuese en moto. Parlotea en exceso.
- Se precipita y responde antes de que hayan acabado las preguntas.
- Le es difícil aguantar su turno.
- Interrumpe o avasalla a los demás.

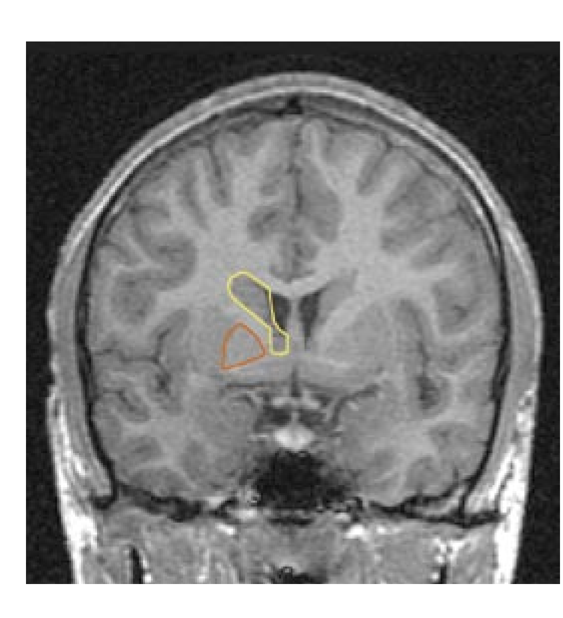
los gemelos idénticos de niños con DHAD padecían el trastorno.

Debemos a Helene Gjone y Jon M. Sundet, de la Universidad de Oslo, uno de los trabajos más exhaustivos en torno al DHAD en hermanos gemelos. Lo realizaron en colaboración con Jim Stevenson, de la Universidad de Southampton. Estudiaron 526 gemelos idénticos, que heredan exactamente los mismos genes, y a 389 mellizos, que no guardan mayor parecido genético que los hermanos nacidos en años diferentes. El equipo halló que el DHAD presentaba una heredabilidad del 80 %; ello significaba que hasta el 80 % de las diferencias en atención, hiperactividad e impulsividad entre los sujetos con DHAD y los que no lo padecían denunciaba una raíz genética.

Entre los factores no genéticos vinculados al DHAD se han venido citando el nacimiento prematuro, el consumo materno de alcohol y tabaco, la exposición a altos niveles de plomo en la temprana infancia y las lesiones cerebrales, especialmente las que atentan contra el córtex prefrontal. Ahora bien, todos estos factores, aunque se den juntos, sólo pueden explicar de un 20 a un 30 % de los casos de chicos con DHAD, y de los de chicas un porcentaje aún menor. (Contrariamente a la creencia popular, ni factores dietéticos, tales como la cantidad de azúcar que consume un niño, ni un entorno familiar de pobreza se ha demostrado que contribuyan al DHAD.)

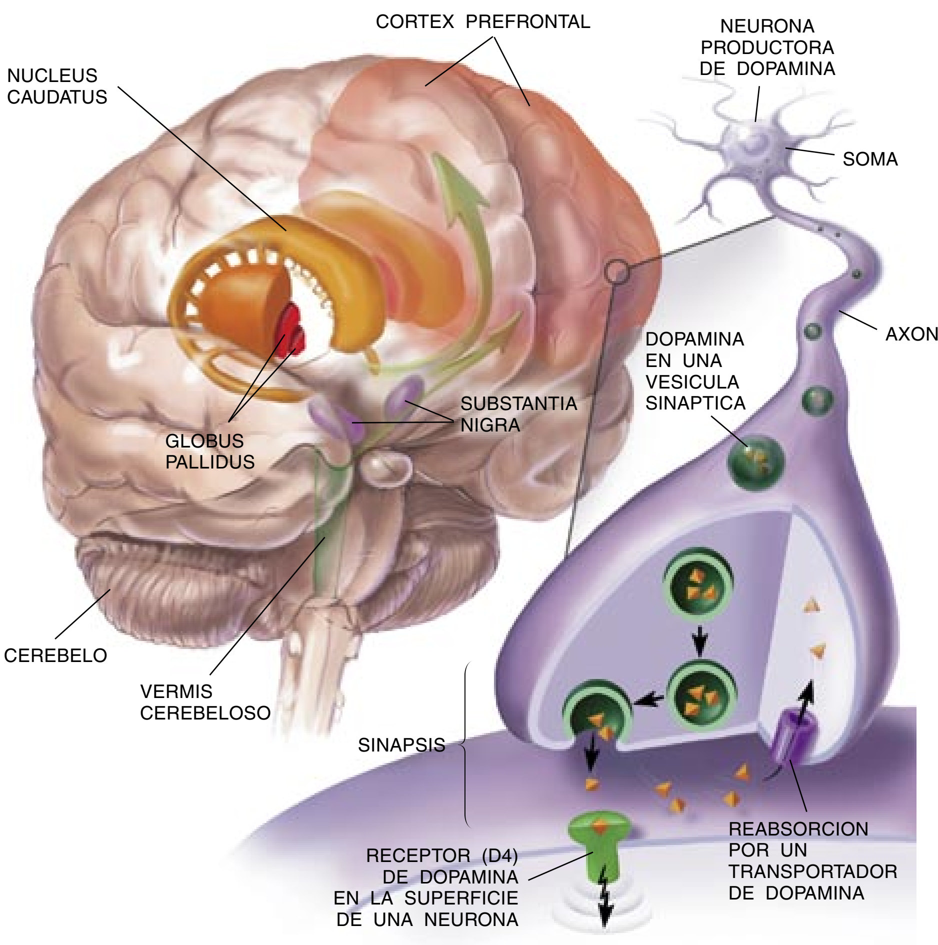
¿Qué genes son los defectuosos? Quizá los que dictan al cerebro la manera de emplear la dopamina. Este neurotransmisor lo segregan neuronas de ciertas zonas del cerebro para inhibir o modular la actividad de otras neuronas, en particular las que intervienen en las emociones y el movimiento. Los trastornos cinéticos de la enfermedad de Parkinson, por ejemplo, los causa la muerte de las neuronas secretoras de dopamina en una región del cerebro situada bajo la *substantia nigra*.

Algunos estudios muy convincentes implican en concreto a los genes que codifican (sirven de plantilla) a los receptores y transportadores de dopamina; tales genes son muy activos en el córtex prefrontal y en los ganglios basales. Los receptores de dopamina están en la superficie de ciertas neuronas; la dopamina entrega a estas neuronas su mensaje enlazándose con los receptores. Los transportadores de dopamina sobresalen de las neuronas que segregan el neurotransmisor y atrapan dopamina sin usar para que



2. EN ESTA IMAGEN de un cerebro normal se han enmarcado el núcleo caudado derecho (*amarillo*) y el globo pálido (*rojo*), estructuras cerebrales reguladoras de la atención, cuyo tamaño es menor en los niños con DHAD.

3. LAS ESTRUCTURAS cerebrales afectadas en el DHAD emplean dopamina para comunicarse entre sí (*flechas verdes*). La investigación sugiere que los pacientes podrían haber experimentado mutaciones en los genes que codifican ya sea al receptor de dopamina D4, que recibe las señales que llegan, ya al transportador de dopamina, que atrapa para su reutilización la dopamina liberada. La sustancia negra, donde la muerte de las neuronas productoras de dopamina causa la enfermedad de Parkinson, no es afectada en el DHAD.



pueda utilizarse en otra ocasión. Si se producen mutaciones en el gen del receptor de dopamina, podrían resultar receptores menos sensibles a la dopamina. Y, a la inversa, las mutaciones en el gen del transportador de dopamina podrían favorecer el advenimiento de transportadores hipereficaces que acaparasen toda la dopamina segregada antes de que tuviera la oportunidad de engarzarse en los receptores de ésta en alguna neurona vecina.

En 1995 Edwin H. Cook y sus colegas, de la Universidad de Chicago, llegaban a la conclusión de que en los niños con DHAD se daba una mayor proclividad hacia una peculiar variante del gen *DAT1* del transportador de dopamina. Un año más tarde, el equipo de Gerald J. LaHoste, de la Universidad de California en Irvine, halló que una variante del gen *D4* del receptor de dopamina se presentaba en esos niños con una frecuencia mucho mayor que en otros normales. Pero la muestra en ambos casos no superó la cincuentena de individuos, número que se pretende ampliar en los trabajos que hay en marcha para confirmar tales resultados.

¿De qué modo promueven las conductas características del desorden de hiperactividad y atención deficiente las estructuras cerebrales y los defectos genéticos mencionados? Es muy posible que se acabe descubriendo que la raíz estriba en el deterioro de la inhibición conductual y del autocontrol, en mi opinión los déficits centrales en el DHAD.

El autocontrol —capacidad de inhibir o frenar las respuestas motoras (y quizá las emocionales) a un estímulo— es una función de crucial importancia para la realización de cualquier tarea. La mayoría de los niños, conforme van creciendo, adquieren la capacidad de poner en práctica las funciones ejecutivas, actividades mentales que les ayudan a apartar las distracciones, fijarse unas metas y dar los pasos necesarios para alcanzarlas. Para conseguir algo en el trabajo o en el juego, las personas han de poder recordar lo que pretenden (percibirlo en retrospectiva), tener en cuenta lo que necesitan para lograrlo (empleando la previsión), refrenar sus emociones e incentivarse. Ninguna de estas funciones podrá ejercerla con éxito quien sea incapaz de inhibir los pensamientos y los impulsos que se interfieran en ellas.

En los primeros años de la vida, las funciones ejecutivas se exhiben al exterior; los niños hablan solos en alta voz mientras recuerdan cómo realizar una tarea o tratan de resolver un problema. A medida que van madurando, interiorizan o convierten en privadas esas funciones ejecutivas, lo que evita que sus pensamientos los conozcan los demás. Diríase, en cambio, que a los niños con DHAD les falta el autodominio y el poder de restricción imprescindibles para cortar la manifestación pública de esas funciones ejecutivas.

Las funciones ejecutivas pueden agruparse en cuatro actividades mentales. Primera, la acción de la memoria operativa, esto es, tener en mente la información mientras se trabaja en una tarea, aunque ya no exista el estímulo que dio origen a esa información. Conviene ese tipo de recuerdo para comportarse con oportunidad y con miras a un fin determinado: posibilita la percepción retrospectiva, la previsión, la preparación y el ser capaces de imitar el comportamiento, complejo y nuevo, de las demás personas. Todo ello está menoscabado en quienes padecen el DHAD.

La interiorización del habla constituye la segunda función ejecutiva. Antes de los seis años, la mayoría de los niños acostumbran hablar solos, recordándose cómo hacer una tarea o tratando de solucionar un problema: "¿Dónde habré puesto aquel libro? ¡Ah, sí, lo dejé debajo del pupitre!" Pisada la escuela primaria, tal hablar privado se convierte en un susurro apenas perceptible, para desaparecer

Modelo psicológico de DHAD

Una pérdida de inhibición conductual y de autocontrol lleva a los siguientes trastornos del funcionamiento del cerebro:

FUNCION MENOSCABADA	CONSECUENCIA	EJEMPLO
Memoria operativa no verbal	Disminución del sentido del tiempo Incapacidad de recordar sucesos Deficiente percepción retrospectiva Deficiente capacidad de previsión	Jorgito, de nueve años, suele olvidar asuntos importantes, tales como cuándo termina el plazo de entrega de sus trabajos o el acudir a una cita con el director después de las clases
Interiorización del autohablarse	Deficiente regulación del comportamiento Escasos autoconducirse y autocuestionarse	Adelita, de cinco años, parlotea demasiado y es imposible hacerle escuchar cualquier indicación sobre cómo realizar bien una tarea
Autorregulación del talante, la motivación y el nivel de vigilia	Manifestación de todas las emociones en público, sin poderlas censurar Menguada autorregulación de los impulsos y las motivaciones	Abel, de ocho años, no puede mantener el esfuerzo que se requiere para leer un cuento apropiado a su edad y se enfurruña y enfurece sintiéndose frustrado en cuanto se le asigna cualquier tarea escolar
Reconstitución (capacidad de dividir en partes componentes las conductas observadas y recombinar esas partes en forma de nuevas conductas para conseguir un fin)	Limitada capacidad de analizar conductas y sintetizar otras nuevas Incapacidad de resolver problemas	Benito, de catorce años, deja de hacer en su casa una tarea escolar al caer en la cuenta de que sólo tiene dos de las cinco preguntas de que constaba el ejercicio; ni se le pasa por las mientes algún modo de salir del paso, por ejemplo llamar a un amigo para que le dicte las otras tres preguntas

hacia los 10 años de edad. Una vez interiorizado, el autohablarse le permite a uno pensar para sí, seguir reglas e instrucciones, cuestionarse la resolución de un problema y construir “meta-reglas” o bases para entender las reglas del servirse de reglas; todo ello rápidamente, sin necesidad de recurrir a la ayuda de otras personas. El grupo dirigido por Laura E. Berk, de la Universidad estatal de Illinois, comprobó, en 1991, que la interiorización del autohablarse se retrasa en los muchachos con DHAD.

Una tercera función mental ejecutiva consiste en controlar las emociones, la motivación y el estar despierto. Este control ayuda a alcanzar metas, pues capacita para diferir o alterar las reacciones emocionales ante un suceso determinado que nos distrae, así como generar emociones y motivaciones. Quienes refrenan sus pasiones o reacciones inmediatas se desenvuelven mejor en sociedad.

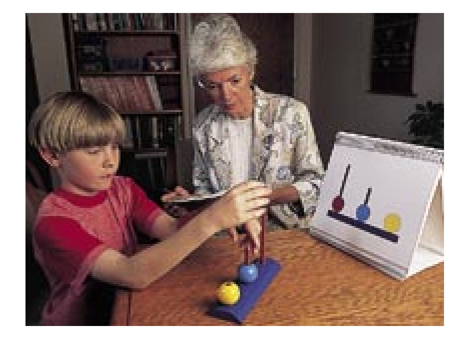
La última función ejecutiva, la de reconstitución, consta de dos procesos distintos, que son la fragmentación de las conductas observadas y la combinación de sus partes en nuevas acciones no aprendidas de la experiencia. La capacidad de reconstituir nos proporciona un alto grado de soltura, flexibilidad y creatividad; permite a los individuos lanzarse hacia una meta sin tener que aprenderse de memoria los pasos intermedios necesarios. A los niños, a medida que éstos maduran, les permite dirigir tramos cada vez más largos de su comportamiento mediante la combinación de conductas concatenadas, de longitud creciente, para el logro de sus fines. De las investigaciones realizadas se desprende que los niños con DHAD muestran menos capacidad de tal reconstitución que sus compañeros.

Para mí, igual que el hablar a solas, las tres funciones ejecutivas restantes se van interiorizando en el curso del desarrollo nervioso de la infancia. Tal privatización es esencial para que se originen la imaginería visual y el pensamiento verbal. Los niños, al crecer, desarrollan la capacidad de encubrir sus actos, de enmascarar sus sentimientos ante la vista de los demás. Por culpa, quizá, de un desarrollo genético o embrionario deficiente, los niños con DHAD no adquieren esa capacidad y, en consecuencia, despliegan un comportamiento y un habla excesivamente públicos. La falta de concentración, la hiperactividad y la impulsividad de los niños con DHAD vendrían causadas, en mi opinión, por una quiebra —la de ser guiados por instrucciones internas— y por una incapacidad —la de enderezar su comportamiento indebido.

Si se demuestra que el DHAD es un fallo de la inhibición conductual que retarda la adquisición de la capacidad para interiorizar y efectuar las cuatro funciones mentales ejecutivas, el descubrimiento abonará la teoría de que a los niños con DHAD se les podría ayudar ambientándolos en un entorno más estructurado. La mayor estructuración constituye un importante complemento de cualquier medicina que se les dé. A los niños (y adultos) con DHAD se les receta Ritalin u otros fármacos que aumentan sus capacidades para inhibir y regular los comportamientos impulsivos. Tales fármacos inhiben el transportador de dopamina, con el incremento consiguiente del tiempo de que dispone la dopamina para unirse a sus receptores en otras neuronas.

Pese a llamárselos psicoestimulantes, estos fármacos inhibidores me-

4. ENTRE LOS TESTS PSICOLOGICOS que se utilizan para investigar el DHAD se incluyen los cuatro aquí representados. El test de construir torres (*arriba a la izquierda*), en el que se pide al sujeto que acumule unas esferas formando torres a imitación de un modelo gráfico, sirve para medir las capacidades de previsión, planificación y perseverancia o constancia en el empeño. El test de matemáticas (*arriba a la derecha*) da a conocer la memoria operativa y la capacidad para resolver problemas. En el test de atención auditiva (*abajo*), el sujeto ha de seleccionar la ficha del color apropiado según las instrucciones de una cinta magnetofónica, a pesar de algunas palabras que mueven a distracción. El test de estimación del tiempo (*abajo a la derecha*) mide la atención visual y el sentido subjetivo de los intervalos de tiempo. Al sujeto se le pide que apriete una tecla para encender una bombilla en la pantalla del ordenador durante el mismo lapso de tiempo en que previamente se había encendido ahí otra bombilla.









joran la conducta de entre un 70 y un 90 % de niños mayores de cinco años. Los que reciben esta medicación no solamente son menos impulsivos, inquietos y distraídos, sino que retienen mejor informaciones importantes, interiorizan más el habla y se autocontrolan mejor. Puesto que entonces se sienten más queridos por sus compañeros y reciben menos castigos, mejoran en su autoestima.

En mi opinión, además de psicoestimulantes —y tal vez antidepresivos para algunos niños—, el tratamiento del DHAD deberá incluir la preparación de padres y maestros en métodos más eficaces. Por citar uno de éstos, pienso en el hacerle ver en seguida al niño las consecuencias de su acción, así como aumentar el uso externo de estímulos y ejemplos sobre reglas e intervalos temporales. Los padres y los educadores deberán ayudar anticipando para esos niños algunos eventos, dividiendo las tareas futuras en tramos más breves y más inmediatos, y valiéndose de recompensas inmediatas. Todos estos pasos contribuyen a externalizar el tiempo, las reglas y las consecuencias, supliendo las débiles formas interiores de información, regulación y motivación de los niños con DHAD.

En ciertos casos, los problemas pueden adquirir gravedad suficiente para justificar la prescripción de un programa de educación especial. Aunque tales programas no estén concebidos para resolver todas las dificultades del niño y curarlo, suelen proporcionarle una ambientación de mayor apoyo, más reducida y menos competitiva, en la que el pequeño puede recibir una instrucción personalizada. Una vez aprendidas las técnicas para superar sus limitaciones en autocontrol, los niños deberían poder desenvolverse en un medio normal.

No hay manera de curar el DHAD. Pero se ha avanzado mucho en el tratamiento eficaz de este persistente y angustioso desorden del desarrollo. A no tardar, dispondremos de pruebas de diagnóstico genéticas y podrán recetarse medicinas que contrarresten la deficiencia de los niños que lo sufren.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EPIDEMIOLOGY OF ATTENTION-DEFICIT HYPERACTIVITY DISORDER. Peter Szatmari, en *Child and Adolescent Psychiatric Clinics of North America*, volumen 1. Dirigido por G. Weiss. W. B. Saunders, 1992.

HYPERACTIVE CHILDREN GROWN UP. Gabrielle Weiss y Lily Trokenberg Hechtman. Guilford Press, 1993.

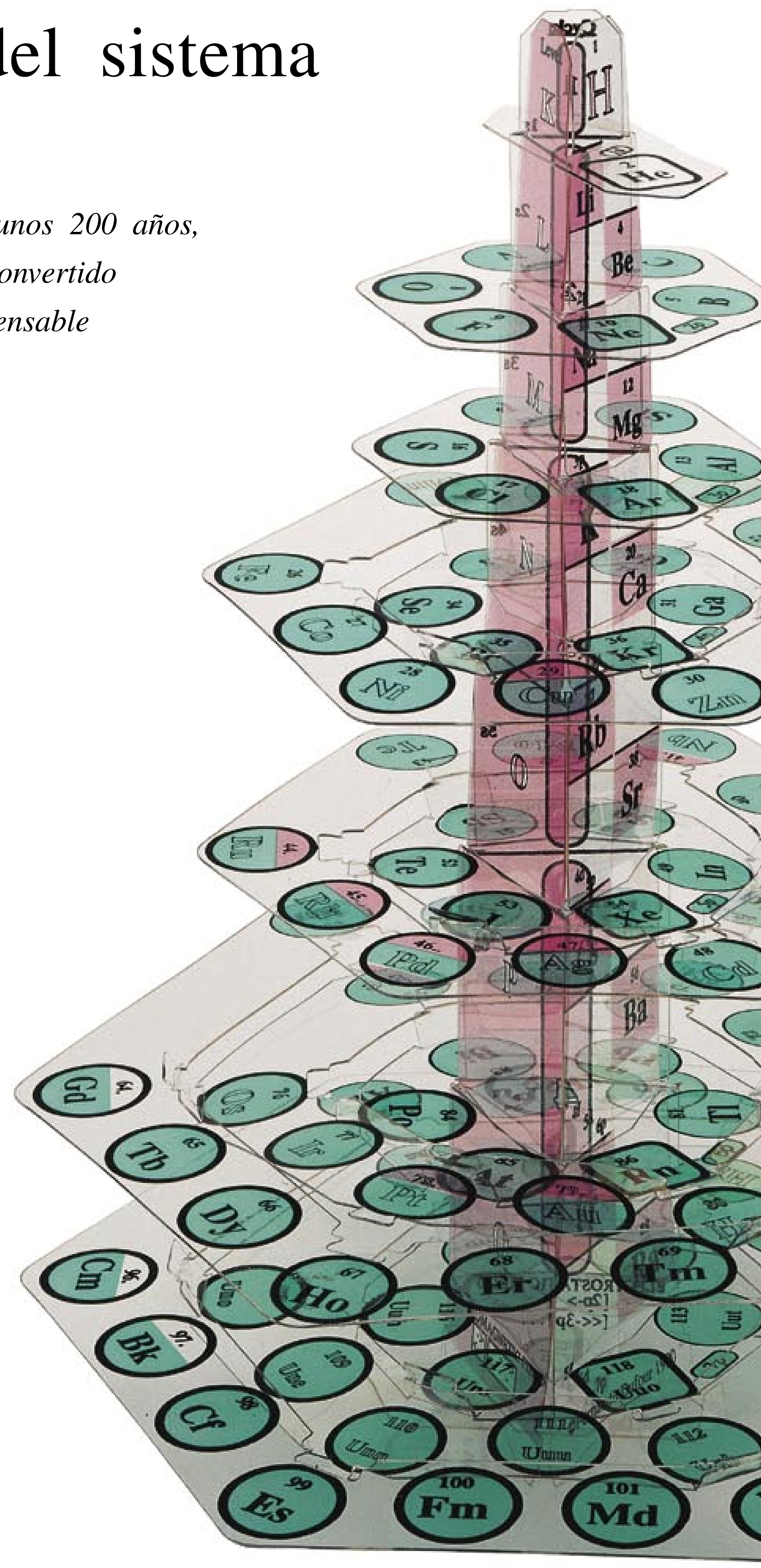
TAKING CHARGE OF ADHD: THE COMPLETE, AUTHORITATIVE GUIDE FOR PARENTS. R. A. Barkley, Gilford Press, 1995.

DOPAMINE *D4* RECEPTOR GENE POLYMORPHISM IS ASSOCIATED WITH ATTENTION DEFICIT HYPERACTIVITY DISORDER. G. J. LaHoste *et al.*, en *Molecular Psychiatry*, vol. 1, n.º 2, páginas 121-124; mayo de 1996.

Evolución del sistema periódico

Desde sus orígenes, hace unos 200 años, la tabla periódica se ha convertido en una herramienta indispensable para la química moderna

Eric R. Scerri



La tabla periódica es uno de los símbolos emblemáticos de la ciencia, un documento que compendia buena parte de nuestros conocimientos sobre química. No falta su estampa, cualquiera que sea la versión de la misma, en los laboratorios y aulas de química del mundo. Ninguna otra disciplina cuenta con algo parecido.

La historia del sistema periódico de clasificación de los elementos empezó hace más de doscientos años. Desde entonces, se ha cuestionado, modificado y mejorado la tabla conforme la ciencia avanzaba y se descubrían nuevos elementos [*véase* "La síntesis de los elementos superpesados", de Peter Armbruster, en este mismo número].

Mas, pese a los profundos cambios operados en la ciencia de los últimos cien años (léase el desarrollo de las teorías de la relatividad y la mecánica cuántica), la estructura básica del sistema periódico no ha sufrido ninguna transformación radical. Cada vez que un nuevo hallazgo parecía cuestionar sus fundamentos teóricos, se acabó por incorporar los resultados manteniendo intacta su estructura fundamental. La tabla periódica destaca por sus raíces históricas no menos que por su interés actual.

El calificativo "periódica" aplicado a la tabla refleja la agrupación, a intervalos regulares, de las propiedades químicas de los elementos. Si no fuera por este eficaz resumen, los alumnos tendrían que aprender las propiedades de los 112 elementos conocidos. Merced a ese guión, los químicos sólo deben dominar las pro-

piedades de unos cuantos elementos típicos, pues el resto pertenece a uno de los grupos o familias que presentan propiedades químicas similares. (En la tabla periódica moderna, cada grupo o familia se corresponde con una columna vertical.)

El descubrimiento del sistema periódico de clasificación de los elementos no es fruto de un momento de inspiración de un individuo, sino que culmina una serie de desarrollos científicos. Ello no obsta para que los historiadores fechen el nacimiento de la tabla periódica moderna el 17 de febrero de 1869, día en que Dimitri Ivanovich Mendeleiev terminó la primera de sus numerosas tablas. Constaba de 63 elementos, ordenados según su peso atómico creciente, pero dejaba espacios libres para elementos no descubiertos, prediciendo su peso atómico.

Antes de Mendeleiev, otros habían elaborado algún tipo de sistema para ordenar y describir los elementos. En 1787, Antoine Lavoisier, junto con Antoine Fourcroy, Louis-Bernard Guyton de Morveau y Claude-Louis Berthollet, ordenó en una lista los 33 elementos conocidos por entonces. Ese tipo de listas eran meras representaciones unidimensionales, mientras que la principal virtud de la tabla moderna radica en la presentación bidimensional, o aun tridimensional, de los elementos (conocidos o predichos por descubrir), en un sistema lógico de filas y columnas que guardan un orden preciso.

Uno de los primeros intentos de organizar los elementos en un cuadro ilustrativo se debe a Johann Döbereiner, quien en 1817 señaló que muchos de los elementos conocidos podían distribuirse, en virtud de su similitud química, en tríadas o grupos de tres. Döbereiner se fijó especialmente en la tríada formada por los elementos litio, sodio y potasio, así como en la formada por cloro, bromo y yodo. Vio que, si se ordenaban los tres miembros de una tríada según su peso atómico, entonces las propiedades del segundo elemento se hallaban entre las del primero y el tercero. Lo ejemplificaba: litio, sodio y potasio reaccionan enérgicamente con el agua; ahora bien, el litio, que es el más ligero de los tres, lo hace en menor medida que los dos restantes, en tanto que el potasio, que es el más pesado de la tríada, provoca una violenta explosión. Döbereiner mostró, además, que el peso atómico del segundo elemento se acercaba al promedio de los pesos del primer y tercer elementos de la tríada.

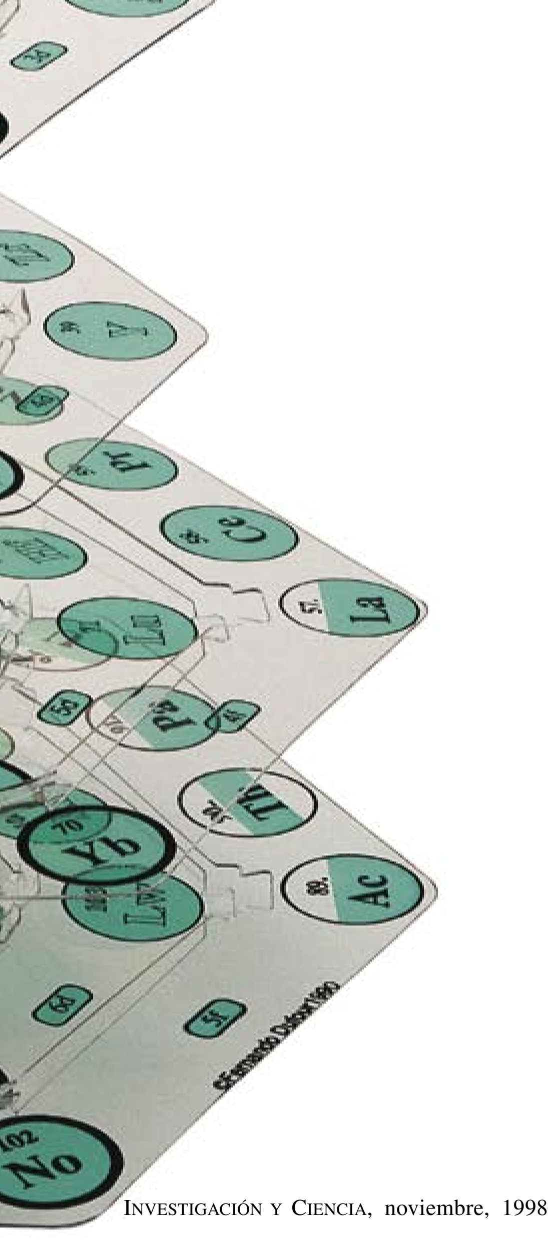
El trabajo de Döbereiner animó a otros a buscar correlaciones entre las propiedades químicas de los elementos y su peso atómico. Peter Kremers siguió con el plan de las tríadas y sugirió que ciertos elementos podían pertenecer a dos tríadas perpendiculares. La propuesta de Kremers de comparar elementos en dos direcciones abría nuevas perspectivas, y acabaría siendo una característica esencial del sistema de Mendeleiev.

ERIC R. SCERRI, experto en historia y filosofía de la química, dirige la revista interdisciplinar *Foundations of Chemistry*. Estudió química en las universidades de Londres, Cambridge y Southampton, y se doctoró en historia y filosofía de la ciencia por el King's College de Londres.

En 1857 Jean-Baptiste-André Dumas abandonó la idea de las tríadas para formular un sistema de ecuaciones que diera cuenta del aumento de peso atómico en varios grupos de elementos que presentaban similaridades químicas. Sin embargo, hoy sabemos que todo intento de ordenar los elementos por su peso atómico está condenado al fracaso, porque el peso atómico no es su propiedad distintiva fundamental.

La característica crucial del sistema de Mendeleiev es que ponía de manifiesto la periodicidad, o repetición, de las propiedades de los elementos a intervalos regulares. Esta periodicidad se manifestaba en la propia ordenación de los elementos por peso atómico que, en 1862, acometió Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois. Su sistema se basaba en una complicada configuración geométrica. Este geólogo francés dispuso los elementos en orden creciente según su peso atómico a lo largo de una espiral, inscrita a su vez sobre la superficie de un cilindro con una inclinación de 45 grados respecto de la base.

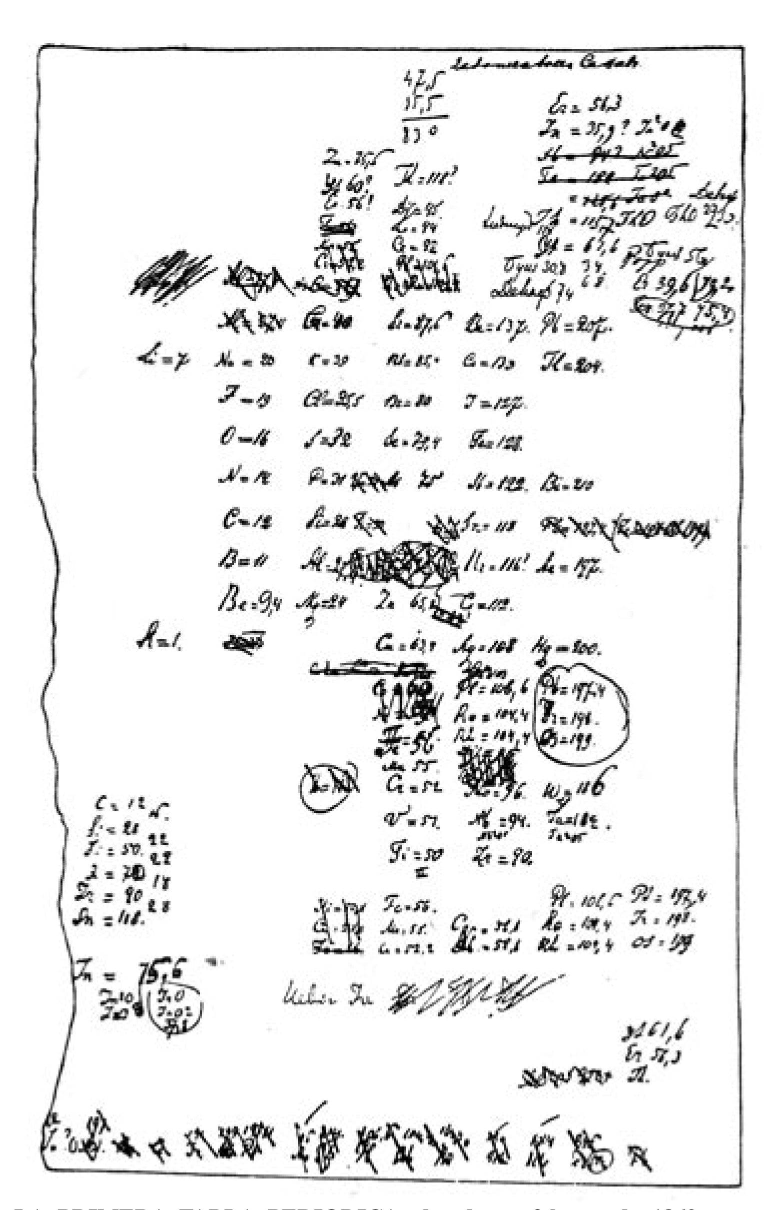
La primera vuelta de la espiral coincidía con el elemento oxígeno, la segunda con el azufre. Los elementos alineados verticalmente sobre la superficie del cilindro tendían a presentar propiedades similares; la disposición revelaba, pues, algunos de los patrones esenciales del sistema



1. LA TABLA PERIODICA TRIDIMENSIONAL transforma la tabla periódica tradicional en una estructura de capas. Las columnas verticales, que en la tabla tradicional corresponden a un grupo o familia de elementos, descienden a lo largo del núcleo central de esta estructura (por ejemplo, H, Li, Na, etcétera), así como a través de las diferentes capas. Los elementos que se hallan uno por encima del otro, como He, Ne, Ar... pertenecen al mismo grupo y tienen propiedades químicas similares. Las filas horizontales, o períodos, de la tabla tradicional se corresponden con las múltiples capas de la tabla tridimensional. Esta versión pone de relieve el crecimiento regular y la simetría del tamaño de los períodos, una característica química fundamental que la mecánica cuántica no ha explicado aún de forma satisfactoria.



2. UNA DE LAS PRIMERAS VERSIONES de un sistema de organización de los elementos, diseñado por Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois en 1862. Conocido como el tornillo telúrico (o elemental), con él se advierte ya la periodicidad química.



3. LA PRIMERA TABLA PERIODICA, datada en febrero de 1869, se debe a Dimitri Ivanovich Mendeleiev. Este borrador muestra grupos de elementos dispuestos en fila, no en las columnas habituales. Mendeleiev construyó tablas de ambas clases.

de Mendeleiev. Con todo, el sistema de de Chancourtois no tuvo demasiado éxito en su época, entre otras razones porque su artículo original no incluía un diagrama de la tabla, el sistema era muy complicado y las similitudes químicas entre elementos no se representaban de manera muy convincente.

En los años sesenta, otros aportaron nuevos modelos de tabla periódica. A partir de valores recién normalizados de los pesos atómicos, John Newlands propuso en 1864 la "ley de los octavos": al ordenar los elementos en razón del peso atómico, cada uno presentaba propiedades similares a las de los elementos situados, en la lista, ocho puestos antes y ocho puestos después.

Newlands dejó algunos espacios vacantes para nuevos elementos en su tabla original, pero la versión más divulgada, la tabla de 1866, no incluía tales huecos. No tardaron en objetarle que no cabrían en ella los nuevos elementos que pudieran descubrirse. Hubo quien se mofó de sus ideas. En una reunión de la Sociedad Química de Londres en 1866, George Carey Foster preguntó a Newlands si había considerado la posibilidad de ordenar los elementos

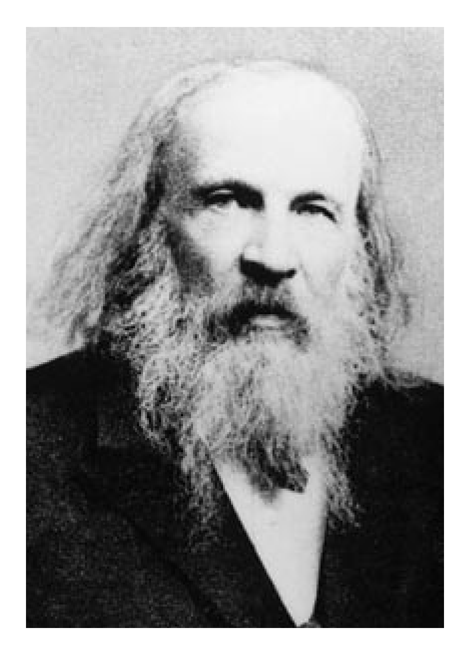
alfabéticamente, dado que cualquier tipo de ordenación presentaría alguna coincidencia. Tras la reunión, la Sociedad Química se negó a publicar el artículo de Newlands.

Aunque fuera recibido con tamaña frialdad, en el trabajo de Newlands se había usado por primera vez una secuencia de números ordinales (en este caso, una secuencia basada en el peso atómico) para organizar los elementos. En este sentido, Newlands se anticipó a la organización moderna de la tabla periódica, basada en la secuencia de "números atómicos". (El concepto de número atómico, que indica el número de protones del núcleo, se introdujo a principios del siglo XX.)

En 1868, durante el proceso de edición del manual de química que había escrito, Julius Lothar Meyer, de la Universidad de Breslau, ideó una tabla periódica que resultó ser extraordinariamente parecida a la famosa versión de Mendeleiev de 1869, aunque Meyer no llegó a clasificar todos los elementos correctamente. Sin embargo, por culpa del editor, la tabla no apareció impresa hasta 1870, lo que vino a complicar la reñida disputa de prioridad que sostuvieron Meyer y Mendeleiev.

Mendeleiev se hallaba también escribiendo un libro de texto de química cuando, casi al mismo tiempo que Meyer, dio forma a su propia tabla periódica. A diferencia de sus predecesores, el ruso confiaba lo bastante en su tabla como para predecir la existencia de nuevos elementos y las propiedades de sus compuestos, así como para corregir el valor del peso atómico de alguno de los elementos conocidos. Mendeleiev admitió haber visto algunas de las tablas anteriores, como la de Newlands, pero negó conocer el trabajo de Meyer al preparar su tabla.

A pesar del avance que supuso la capacidad predictiva de la tabla de Mendeleiev, los historiadores tienden a exagerar su importancia y sugieren que ésta fue la razón última de la aceptación de la tabla. No advierten que el texto que acompaña a la Medalla Davy de la Regia Sociedad de Londres (otorgada a Mendeleiev en 1882) no menciona sus predicciones en absoluto. La habilidad de Mendeleiev para acomodar los elementos conocidos puede haber contribuido a la aceptación de su sistema tanto como sus sorprendentes predicciones. Aunque muchos contribuyeron al desarrollo del sistema periódico, se





4. LOS QUIMICOS Mendeleiev (*izquierda*) y Julius Lothar Meyer (*derecha*) desarrollaron simultáneamente la tabla periódica moderna a finales de los años sesenta del siglo XIX, pero la de Mendeleiev fue la primera en ser publicada. Se atribuye al ruso el descubrimiento del sistema periódico porque se basó en él para hacer numerosas predicciones acertadas y defendió enérgicamente su validez.

suele atribuir a Mendeleiev el descubrimiento de la periodicidad química porque elevó tal descubrimiento a ley de la naturaleza y dedicó el resto de su vida a examinar sus consecuencias y defender su validez.

Defender la tabla periódica no era nada sencillo. Se sucedieron los hallazgos que cuestionaban una y otra vez su precisión. Así, en 1894, cuando William Ramsay, del University College de Londres, y Lord Rayleigh (John William Strutt), de la Regia Institución de Londres, descubrieron el elemento argón. Durante los años siguientes, Ramsay anunció el descubrimiento de otros cuatro elementos (helio, neón, criptón y xenón), denominados gases nobles. (El último de los gases nobles conocidos, el radón, fue descubierto por Friedrich Ernst Dorn en 1900.)

El calificativo "noble" responde al comportamiento de tales gases, que parecen mantenerse al margen del resto de los elementos y rara vez forman compuestos con ellos. Por eso hubo quien sugirió que los gases nobles ni siquiera pertenecían a la tabla periódica. Ni Mendeleiev ni nadie había predicho la existencia de estos elementos; sólo tras seis años de intensos esfuerzos se logró incorporarlos a la tabla periódica. Para ello tuvo que añadirse una columna adicional entre los halógenos (los gases flúor, cloro, bromo, yodo y astato) y los metales alcalinos (litio, sodio, potasio, rubidio, cesio y francio).

Otro de los problemas que planteó la tabla de Mendeleiev concernía a la ordenación exacta de los elementos. En la versión original los elementos estaban dispuestos según su peso atómico, pero en 1913 Anton van den Broek, físico teórico, propuso como criterio de ordenación la carga nuclear de cada átomo. Esta hipótesis fue sometida a prueba por Henry Moseley, de la Universidad de Manchester, poco antes de morir trágicamente durante la Primera Guerra Mundial.

Moseley empezó por fotografiar el espectro de rayos X de 12 elementos, 10 de los cuales ocupaban puestos adyacentes en la tabla periódica. Descubrió que la frecuencia de la línea K del espectro de cada elemento era directamente proporcional al cuadrado del entero que indicaba la posición del elemento en la tabla. Para Moseley esto probaba "la existencia en el átomo de una cantidad fundamental, que aumenta de forma regular al pasar de un elemento al siguiente". Esta cantidad fundamental, que en 1920 Ernest Rutherford, de la Universidad de Cambridge, llamó por primera vez número atómico, se identifica ahora con el número de protones en el núcleo.

El trabajo de Moseley ofrecía un método para determinar exactamente cuántos puestos vacantes quedaban en la tabla periódica. Una vez descubierto, los químicos pasaron a usar el número atómico, en lugar del peso atómico, como principio básico de ordenación de la tabla. El cambio eliminó muchos de los problemas pendientes en la disposición de los elementos. Por ejemplo, al ordenar el yodo y el telurio según su peso atómico (con el yodo primero), ambos parecían ocupar una posición incorrecta en lo que respecta a su comportamiento químico. Pero si se ordenaban según su número atómico (con el telurio delante) los dos elementos ocupaban sus posiciones correctas.

La tabla periódica no sólo inspiró el trabajo de los químicos, sino también el de los físicos que se afanaban por desentrañar la estructura del átomo. En 1904, J. J. Thomson (descubridor del electrón) desarrolló un modelo del átomo que explicaba la periodicidad de los elementos. Thomson propuso que los átomos de cada elemento contenían un número determinado de electrones dispuestos en anillos concéntricos. Los elementos con una configuración electrónica similar gozarían, según Thomson, de propiedades similares, lo que suponía la primera explicación física de la periodicidad de los elementos. Thomson imaginaba los anillos de electrones integrados en el cuerpo principal del átomo, y no orbitando alrededor del núcleo, como se cree hoy. Con todo, su modelo es el primero en abordar la disposición de los electrones en el átomo, una idea fundamental para la química moderna.

Niels Bohr, que relacionó teoría cuántica y estructura atómica, se inspiró también en la ordenación de los elementos del sistema periódico. En el modelo atómico que Bohr desarrolló en 1913, los electrones ocupan una serie de capas concéntricas alrededor del núcleo. Para el físico danés, la capa exterior de los elementos de cada grupo de la tabla tendría la misma configuración electrónica, puesto que las propiedades químicas de un elemento dependerían en gran medida de la disposición de los electrones en la capa exterior del átomo.

El modelo atómico de Bohr explicaba también por qué los gases nobles no reaccionaban con otros elementos: su capa electrónica exterior está completamente ocupada, lo que los hace extraordinariamente estables y reacios a formar compuestos. Según estudios recientes de la génesis del modelo atómico de Bohr, éste recurrió a la química más de lo que suele suponerse; y no dedujo de la mecánica cuántica las configuraciones de los electrones, sino a partir de las propiedades químicas y espectroscópicas de los elementos.

En 1924 Wolfgang Pauli propuso su "principio de exclusión" para explicar la longitud de cada fila o período de la tabla. El principio afirma que no pueden coincidir dos electrones en el mismo estado cuántico, definido éste por los llamados números cuánticos. La longitud de los distintos períodos viene dada por las pruebas experimentales sobre la forma en que se van ocupando las capas electrónicas, así como por las restricciones teóricas sobre los cuatro números cuánticos que pueden adoptar los electrones.

A mediados de los años veinte, gracias a las modificaciones de Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger, la mecánica cuántica adquirió la forma con que ha llegado hasta nosotros. Pero la influencia ejercida por tales cambios en la tabla periódica ha sido mínima. Pese a los esfuerzos de químicos y físicos, la teoría no ha arrojado más luz sobre la tabla. No ha podido explicar por qué los electrones ocupan las diversas capas en cierto orden. Las configuraciones electrónicas de los átomos, sobre las cuales reposa la interpretación moderna de la tabla, no pueden ser estrictamente deducidas a partir de la mecánica cuántica. En primer lugar, la ecuación fundamental (la ecuación de Schrödinger) sólo tiene solución exacta en el caso del hidrógeno. En segundo lugar, incluso con las aproximaciones que se introducen de rutina en química

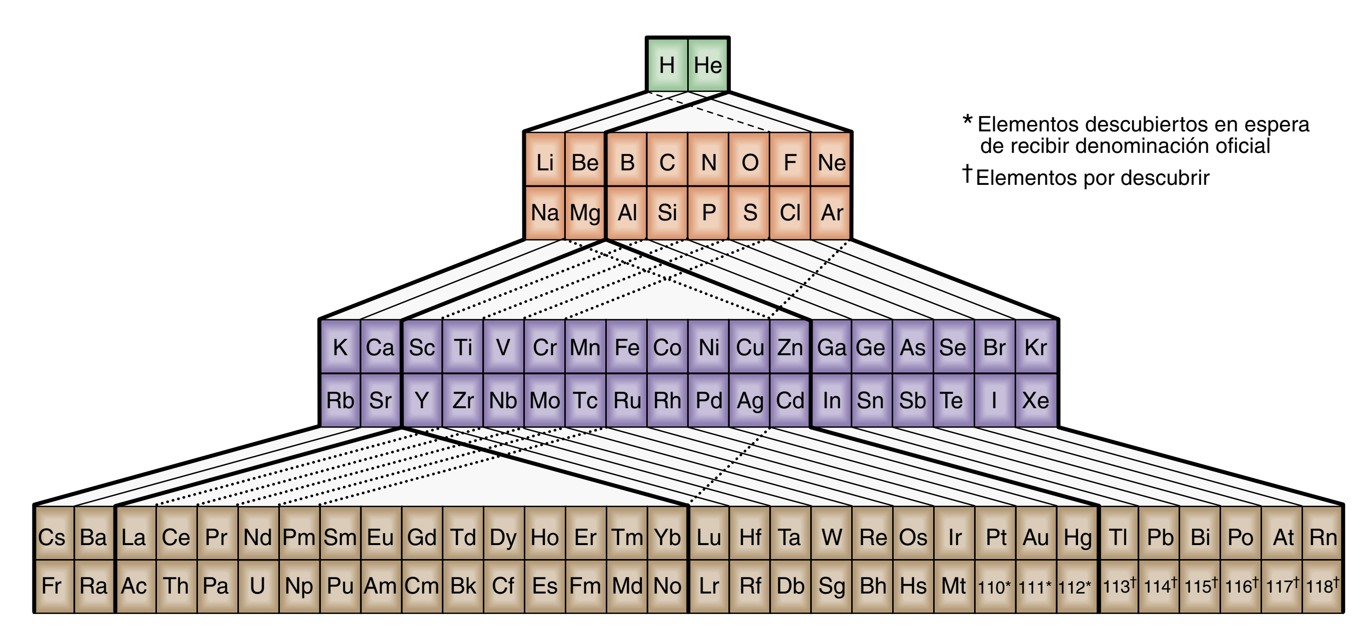
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110*	111*	112*	113†	114†	115†	116†	117†	118†

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Td	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No

5. LA TABLA PERIODICA POPULAR, conocida también como modelo largo, decora la mayoría de las clases y laboratorios de química de todo el mundo. Esta versión tiene la ventaja de presentar, en columnas verticales, grupos de elementos que poseen propiedades químicas similares, aunque lo hace a costa de la simetría. (Los diferentes colores de la tabla indican elementos con el mismo tipo de corteza electrónica exterior.)

* Elementos descubiertos en espera de recibir denominación oficial

† Elementos por descubrir



6. LA TABLA PIRAMIDAL es un tipo de tabla periódica que representa la simetría de la ley periódica, especialmente en lo que se refiere a la longitud de los sucesivos períodos. Esta que se muestra es una versión modificada de la tabla desarrollada por William B. Jensen, de la Universidad de Cincinnati. Las líneas gruesas indican elementos con el mismo tipo de corteza electrónica exterior; las líneas finas denotan elementos que pertenecen al mismo grupo; las líneas punteadas muestran relaciones secundarias entre propiedades químicas.

cuántica, nadie ha logrado deducir el orden correcto de la ocupación de las capas. Así pues, sólo podemos afirmar que la mecánica cuántica reproduce el descubrimiento original de Mendeleiev mediante el uso de aproximaciones matemáticas, pero no puede predecir el sistema periódico.

En los últimos años han aparecido versiones alternativas del sistema periódico. Fernando Dufour, profesor retirado del Colegio Ahuntsic de Montreal, ha desarrollado una tabla periódica tridimensional que, a diferencia de la bidimensional al uso, pone de manifiesto la simetría fundamental de la ley periódica. La misma virtud presenta una versión piramidal de la tabla periódica, propuesta en numerosas ocasiones y recientemente refinada por William B. Jensen, de la Universidad de Cincinnati.

También se han inventado sistemas periódicos que resumen las propiedades de los compuestos, y no las de los elementos. En 1980 Ray Hefferlin, de la Universidad Adventista del Sur en Collegedale, ordenó en un sistema periódico todas las moléculas diatómicas concebibles entre los 118 primeros elementos (de los que sólo se han descubierto 112 hasta ahora).

La tabla de Hefferlin revela que ciertas propiedades de las moléculas, así la distancia entre átomos o la energía necesaria para ionizar la molécula, se dan según patrones regulares, lo que nos faculta para predecir correctamente las propiedades de las moléculas diatómicas.

De forma parecida, Jerry R. Dias, de la Universidad de Missouri en Kansas City, ha esbozado una clasificación periódica de un tipo de molécula orgánica conocida como hidrocarburos aromáticos (derivados del benceno), que incluyen por ejemplo el naftaleno ($C_{10}H_8$) que se usa contra la polilla. El sistema de clasificación de Dias es análogo a las tríadas de Döbereiner: el número de átomos de carbono e hidrógeno de la molécula en el centro de una tríada es el promedio del que caracteriza a las moléculas que la flanquean, lo mismo en sentido vertical que horizontal. Con este esquema podemos estudiar sistemáticamente las propiedades de los hidrocarburos aromáticos; unido a la teoría de grafos, ha permitido predecir la estabilidad y la reactividad de algunos de estos compuestos.

Con todo, la tabla periódica de los elementos es la que ha ejercido mayor influencia durante más tiempo. Desarrollada y refinada a lo largo de más de 200 años, sigue ocupando un lugar preeminente en el estudio de la química. La tabla representa una de las ideas más fructíferas de la ciencia moderna, comparable tal vez a la teoría de la evolución de Darwin. A diferencia de la mecánica newtoniana y otras teorías, no ha sido desmentida ni transformada de raíz por la física moderna, sino que ha sabido adaptarse y madurar sin turbación apenas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PERIODIC SYSTEM OF CHEMICAL ELEMENTS: A HISTORY OF THE FIRST HUNDRED YEARS. J. W. van Spronsen. Elsevier, 1969.

THE SURPRISING PERIODIC TABLE: TEN REMARKABLE FACTS. Dennis H. Rouvray en *Chemical Intelligencer*, vol. 2, n.º 3, páginas 39-47; julio 1996.

CLASSIFICATION, SYMMETRY AND THE PERIODIC TABLE. William B. Jensen en *Computing and Mathematics with Applications*, vol. 12B, n.os 1 y 2, páginas 487-510; 1989.

PLUS ÇA CHANGE. E. R. Scerri en *Chemistry in Britain*, vol. 30, número 5, páginas 379-381; mayo 1994. (Este número contiene otros artículos relacionados con el mismo tema.)

THE ELECTRON AND THE PERIODIC TABLE. E. R. Scerri en *American Scientist*, vol. 85, páginas 546-553; noviembre-diciembre 1997.

Puede obtenerse información sobre la tabla periódica tridimensional de Fernando Dufour enviando un mensaje electrónico a fernduf@aei.ca

La síntesis de los elementos superpesados

Ciertos efectos observados en la estructura de los núcleos, junto con una técnica experimental de primera línea, han posibilitado producir los elementos de números atómicos 107 al 112

Peter Armbruster

El año 1896 se produjo un cambio radical en la estructura de conocimiento de la física. Antoine Henri Becquerel (1852-1908), profesor del Museo Nacional de Historia Natural de París, observó hacia finales de febrero de aquel año que las sales de uranio emitían una radiación que era capaz de velar las placas fotográficas y de atravesar incluso hojas metálicas. Ese descubrimiento de la radiactividad en sustancias naturales fue el origen de una nueva rama del conocimiento: la física nuclear.

Conviene recordar que hubo que esperar hasta mediados del siglo pasado para que se llegase al convencimiento de que la materia está formada por componentes diminutos, los átomos y las moléculas. Los átomos (del griego *atomos*, que significa indivisible) de los elementos químicos debían poseer además unas dimensiones y una masa fijas, para que no les afectasen las transiciones químicas. El descubrimiento de Becquerel originó un enorme número de trabajos de investigación, en los que quedó patente que los átomos no siempre son indivisibles, sino que por el contrario se descomponen a veces en unidades más pequeñas.

Al principio los únicos metales pesados conocidos que tenían esta propiedad eran el uranio y el torio. Pero la pareja científica constituida por Marie (1867-1934) y Pierre Curie (1859-1906) fue capaz de identificar dos nuevos elementos radiactivos, a saber, el polonio y el radio, ya en 1898, en muestras de pechblenda uranífera. Hasta 1940 se habían encontrado otros cinco elementos inestables: astato, radón, francio, actinio y protoactinio. Pudieron así rellenarse los vacíos que había en la tabla periódica de los elementos entre el bismuto, el elemento estable más pesado (al que inicialmente se denominaba wismuto), y el uranio, que era el elemento radiactivo natural más pesado.

En esa época pionera de la física nuclear —el período de la radiactividad— se puso de manifiesto que los átomos poseen un núcleo cargado positivamente y que está rodeado por una envoltura de electrones negativos, de tal forma que para un observador exterior aparecen como neutros. El núcleo está constituido por dos componentes bien diferenciados de masa muy similar: los protones, que son positivos, y los neutrones, que son neutros; pese a la fuerza de repulsión eléctrica entre los protones, el núcleo atómico se mantiene como un todo, debido a que entre todos sus componentes —denominados nucleones— existe una fuerza de atracción muy intensa que actúa a muy cortas distancias.

Las propiedades químicas de los elementos están determinadas por el número de los electrones de las capas (que en total es idéntico al número de protones del núcleo, el llamado número de orden o número atómico, *Z*). Su peso atómico, por el contrario, lo determina el número de protones y de neutrones. Núcleos de un mismo elemento pueden pues contener distinto número de neutrones; se dice que constituyen isótopos distintos, que son químicamente idénticos pero que se distinguen por el número de nucleones y, por ende, en el peso atómico. Mientras que los núcleos ligeros contienen aproximadamente el mismo número de protones que de neutrones, los pesados poseen muchos más de estos últimos.

Algunos isótopos son menos estables que otros y pueden descomponerse mediante la emisión radiactiva, para acomodarse en configuraciones más estables. Tal hecho sucede bien por emisión de una partícula alfa (un núcleo de helio) o por conversión de un neutrón en un protón, con emisión por parte del núcleo de un electrón y un antineutrino. Ambos procesos de desintegración, denominados alfa y beta, respectivamente, modifican el número de protones del núcleo. En consecuencia se origina siempre un nuevo elemento, el cual puede que a su vez sea inestable y siga descomponiéndose.

Síntesis de elementos

Esa nueva comprensión básica de la constitución de los átomos condujo a una segunda etapa de la física nuclear, denominada período de los neutrones en la síntesis de elementos. Los neutrones pueden introducirse libremente en los núcleos atómicos y provocar en ellos transiciones nucleares. Esta posibilidad fue ya investigada por el físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) muy poco después del descubrimiento del neutrón por su colega británico James Chadwick (1891-1974), en el año 1932. Mediante la absorción de un neutrón y la consiguiente emisión

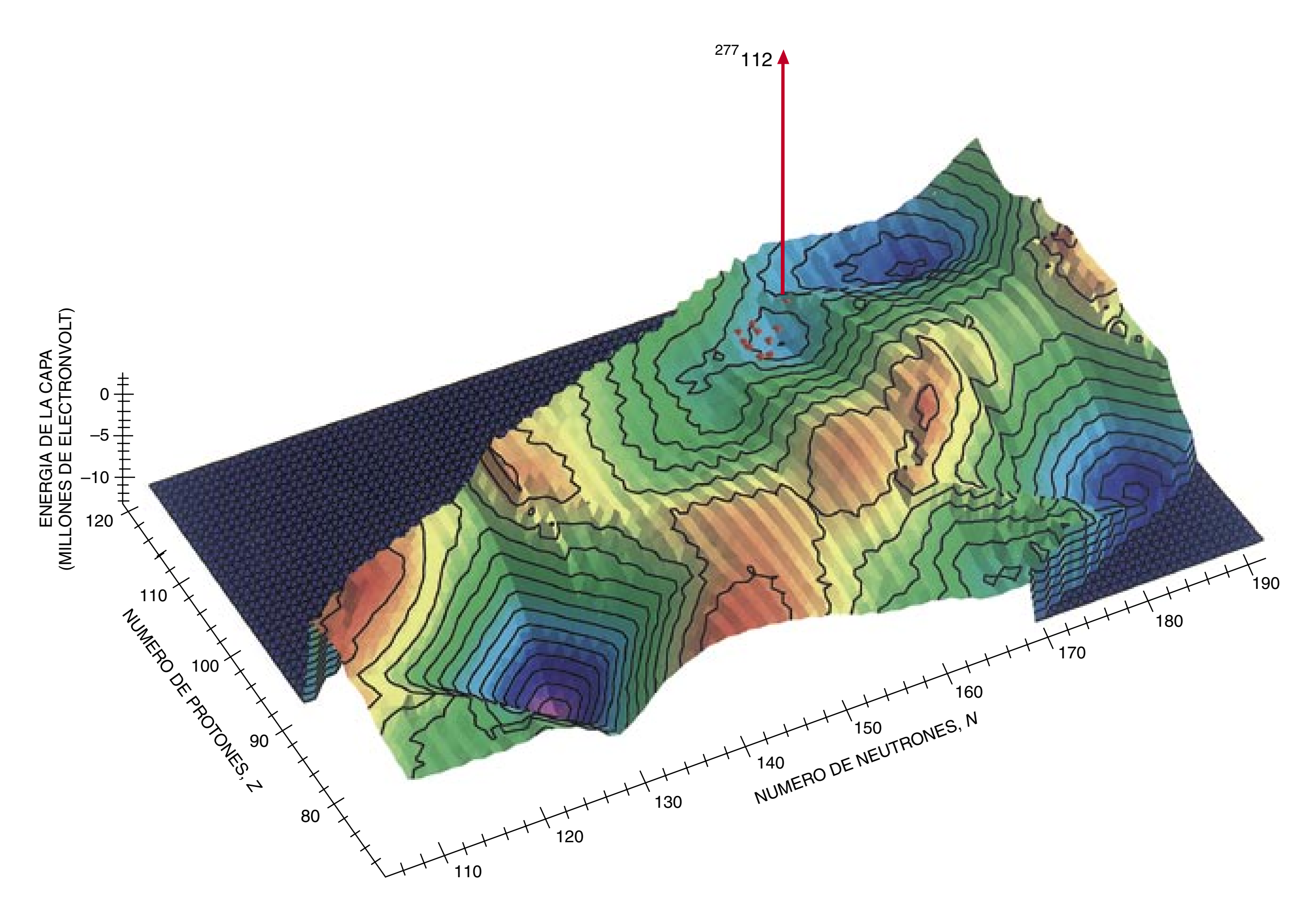
PETER AMBRUSTER dirige desde 1971 la Sociedad para la Investigación de Iones Pesados de Darmstad (GSI). Estudió en las Escuelas Técnicas Superiores de Stuttgart y Munich, donde se doctoró y posteriormente habilitó, en 1964. Como director del departamento de Química Nuclear ha participado de modo fundamental en los trabajos de síntesis de los elementos 107 a 112.

beta el núcleo gana un protón, por lo que como elemento salta un peldaño hacia arriba en la ordenación por número atómico.

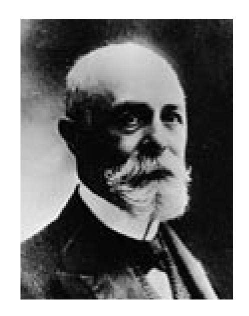
Fermi propuso en 1934 que por este procedimiento podría intentarse construir elementos más pesados que el uranio ($Z=92$). Diversos grupos de investigadores tomaron la idea en serio. En Berlín, por ejemplo, la física Lise Meitner (1878-1968) junto con los químicos Otto Hahn (1879-1968) y Fritz Strassmann (1902-1980) iniciaron la búsqueda de tales elementos transuránidos, mediante la irradiación de uranio con neutrones procedentes de una fuente (usual por aquel entonces) de radio-berilio. Luego analizaban los productos de la reacción por métodos radioquímicos. Hahn y Strassmann consiguieron demostrar en diciembre de 1938 que con tales intentos habían conseguido obtener bario ($Z=56$). Meitner, que había huido a Suecia durante el verano de aquel año, y su sobrino, el físico Otto Frisch (1904-1979), comprobaron que tal resultado era correcto, es decir que, en lugar de obtener un elemento más pesado, el núcleo de uranio se partía en dos pedazos más ligeros por efecto del bombardeo con neutrones lentos.

El hecho de que en la fisión de los núcleos de uranio se emitiese una gran cantidad de energía y el de que se liberasen dos neutrones, que podían originar nuevas fisiones, hizo posible la construcción de reactores, en los que dicho proceso tenía lugar de una manera controlada, así como también la construcción de artefactos nucleares y de bombas, que hicieron uso incontrolado del efecto de alud de la reacción en cadena que se produce, consiguiendo su detonación y una potencia destructiva desconocida hasta entonces.

Un papel fundamental en el proceso que estamos describiendo lo desempeñó el ciclotrón de Lawrence, desarrollado en la Universidad de California en Berkeley, en 1931, por el físico Ernest O. Lawrence (1901-1958). Emilio Segré (1905-1989) y sus colaboradores ya habían conseguido producir mediante tal aparato el primer elemento artificial, el tecnecio (Tc, $Z=43$), en 1937 y en Roma, irradiando una muestra de molibdeno con deuterones. Edwin McMillan (1907-1991) y Philip H. Abelson descubrieron en Berkeley, en 1940, el primer elemento transuránido, el neptunio (Np, $Z=93$), en una muestra de uranio irradiada con neutrones. Al año siguiente y en el mismo laboratorio, un grupo liderado por Glenn T. Seaborg obtuvo

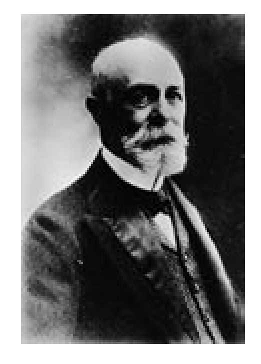


1. ENERGIA DE LAS CAPAS de los núcleos atómicos más pesados que el núcleo de plomo (número de protones $Z = 82$), calculada teóricamente. De acuerdo con el modelo de gota, todos los átomos de más de unos 100 protones serían inestables, desintegrándose espontáneamente una vez producidos. Sin embargo, la energía que liga los protones y los neutrones de los átomos superpesados depende también de efectos mecánico-cuánticos, lo que conduce a que estos nucleones posean niveles de energía discretos. Esta energía de capa es negativa, ya que estabiliza el núcleo. Cuando una capa está completamente llena de nucleones, sólo es posible un cambio de su estado si se aporta una cantidad de energía suficiente para superar el salto hasta un nivel de energía superior. La energía de capa se representa en esta gráfica —debida a Peter Moller, 1993— como las curvas de nivel de un mapa topográfico. El efecto de estabilización es máximo en las hondonadas profundas (*color violeta*), como es el caso del plomo-208 ($Z = 82$, $N = 126$) y de las cercanías del núcleo superpesado hipotético $^{298}114$ ($Z = 114$, $N = 184$). Se halla otra depresión de estabilidad realzada para $Z = 106$ y $N = 162$. Con puntos rojos se señalan los núcleos sintetizados por el Instituto de Investigación en Iones Pesados de Darmstadt.



Antoine Henri Becquerel (*izquierda*) descubrió en 1896 la radiactividad natural. Fueron, sin embargo, Marie Curie y su esposo Pierre quienes investigaron sistemáticamente este fenómeno hasta que terminaron por encontrar en las muestras uraníferas dos nuevos elementos radiactivos: el polonio y el radio. Los tres investigadores fueron galardonados con el premio Nobel de física de 1903 por su explicación del fenómeno de la radiactividad. Marie Curie obtuvo además el premio Nobel de química por su descubrimiento de los elementos polonio y radio.

Enrico Fermi (*derecha*, premio Nobel en 1938) propuso en 1934 el bombardeo de uranio con neutrones como método para la producción de elementos más pesados. En 1942 construyó con sus colaboradores el primer reactor nuclear.



1938: Otto Hahn (premio Nobel de química en 1944) y Fritz Strassmann descubrieron la desintegración del uranio inducida por neutrones.

1913: Frederick Soddy (premio Nobel de química en 1921) introduce el concepto de isótopo y explica de esta forma los distintos semiperíodos observados para un mismo elemento.

1898: Polonio ($Z=84$), Radio ($Z=88$)

1899: Actinio ($Z=89$)

1908: Radón ($Z=86$)

1917: Protoactinio ($Z=91$)

1939: Francio ($Z=87$)

1940: Astato ($Z=85$) Neptunio ($Z=93$)

1941: Plutonio ($Z=94$)

1944: Americio ($Z=95$) Curio ($Z=96$)

1896 Período de la radiactividad **1940** Período de los neutrones en la

2. LOS CUATRO PERIODOS de los elementos radiactivos. El uranio y el torio ya se conocían desde 1789 y 1828, respectivamente. En 1896 Antoine Henri Becquerel descubrió la radiactividad del uranio. El matrimonio formado por Marie y Pierre Curie encontró esta misma propiedad en el torio, descubriendo en 1898 dos nuevos elementos radiactivos, el polonio y el radio. Hasta 1940 se fueron descubriendo todos los elementos entre el bismuto y el uranio, situados consecutivamente en las cadenas de desintegración de los isótopos primordiales torio 232, uranio 235 y uranio 238. Tras la construcción del ciclotrón en 1931 por Ernest O. Lawrence (premio Nobel de física en 1939) y el descubrimiento del neutrón en 1932 por parte de James Chadwick (premio Nobel de física en 1935), así como gracias a los trabajos conducentes a la construcción

el siguiente elemento de la escala, el plutonio (Pu, $Z=94$).

Después de la construcción por Fermi, Leo Szilard (1898-1964) y sus colaboradores del primer reactor nuclear, en 1942, pudo producirse plutonio en grandes cantidades. Merced a su irradiación con neutrones, deuterones y partículas alfa se esperaba que pudiesen sintetizarse elementos transuránidos. Sin embargo, la detección química de los nuevos elementos resultó muy difícil. Se consiguió superar esta situación cuando Seaborg demostró que los transuránidos eran miembros de una nueva familia, los actínidos, de propiedades químicas similares a la de los lantánidos. Finalmente, en 1944, su grupo pudo encontrar el americio (Am, $Z=95$) y el curio (Cm, $Z=96$).

Dos isótopos de estos nuevos elementos —el americio 241 y el curio 242— fueron producidos en un reactor en cantidades suficientes e irradiados luego en el ciclotrón con partículas alfa. Con ello se produjeron dos nuevos elementos, que pudieron ser aislados radioquímicamente en diciembre de 1949 y febrero de 1950, a saber, el berkelio (Bk, $Z=97$) y el californio (Cf, $Z=98$).

Pese a la búsqueda sistemática de nuevos elementos transuránidos que se llevó a cabo, los dos siguientes, el einstenio (Es, $Z=99$) y el fermio (Fm, $Z=100$), se descubrieron de manera inesperada —en los desechos de la explosión de la bomba de hidrógeno experimental "Mike", que los Estados Unidos detonaron en el Pacífico en 1952—. Investigadores del Laboratorio Nacional de Argonne, cerca de Chicago, y de Berkeley, entre los que volvía a encontrarse Seaborg, así como Albert Ghiorso, los descubrieron investigando muestras de polvo acumuladas en los filtros de aire de aviones que sobrevolaron la zona. El inmenso flujo de neutrones de la reacción de fusión había formado núcleos de uranio tan enormemente ricos en neutrones que, por medio de sucesivas desintegraciones beta, se habían obtenido elementos posteriores al californio.

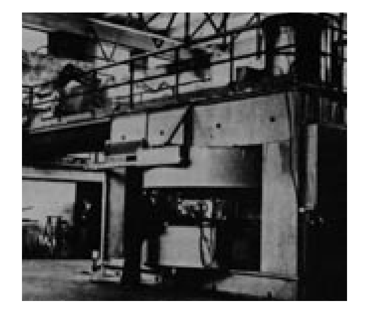
Estos ocho transuránidos se produjeron luego por el método de Fermi (combinación de la captura de neutrones y la desintegración beta) en cantidades que pudieron pesarse en el laboratorio. La cantidad de plutonio que hay ahora en el mundo es de varios miles de toneladas, mientras que la de fermio es de tan sólo una millonésima de gramo (unos 10^{10} átomos). No es sólo el elemento más raro y escaso que puede sintetizarse mediante bombardeo con neutrones, sino también el más pesado. Ninguno de sus isótopos consigue transformarse mediante desintegración beta en otro elemento de número de orden más elevado. Para producir elementos transfermiónidos la técnica de bombardeo con neutrones no resulta de ninguna utilidad y debe hacerse uso de proyectiles más pesados.

Aceleradores

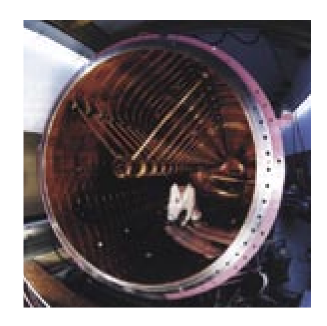
Se pensó entonces en producir cantidades suficientes de los actínidos más pesados en reactores de flujo elevado y en bombardearlos luego con iones diversos —desde partículas alfa hasta oxígeno— en un acelerador. Esta idea supuso sin embargo un gran reto a la técnica experimental, dado que la fusión de dos núcleos cargados tiene muchas desventajas prácticas, si se compara con la captura de neutrones.

Para empezar, hay que superar la barrera de Coulomb, que es la repulsión electrostática que se produce entre dos núcleos cargados, lo que sólo se consigue si el choque es central y se produce con extraordinaria energía. Por otra parte, cuando el núcleo blanco se fusiona con el ion acelerado, adquiere una energía de

Con el método propuesto por Fermi y el ciclotrón de 60 pulgadas de la Universidad de California en Berkeley (*derecha*) se sintetizaron siete elementos transuránidos: neptunio, plutonio, americio, curio, berkelio, californio y mendelevio. Por bombardeo de actinio con iones ligeros se consiguió también producir los elementos hasta $Z=106$, en Berkeley y Dubna (Rusia).



El acelerador lineal UNILAC del Instituto de Investigación en Iones Pesados de Darmstadt (*derecha*) junto con una técnica de reconocimiento muy elaborada propiciaron la síntesis de los elementos superpesados mediante fusión suave. Aquí se produjeron los elementos 107 al 112.



1949: Berkelio ($Z=97$)
1950: Californio ($Z=98$)
1952: Einstenio ($Z=99$), Fermio ($Z=100$)
1955: Mendelevio ($Z=101$)
1965: Nobelio ($Z=102$), Lawrencio ($Z=103$)
1969: Rutherfordio ($Z=104$)
1970: Dubnio ($Z=105$)
1974: Seaborgio ($Z=106$)
1981: Bohrio ($Z=107$)
1982: Meitnerio ($Z=109$)
1984: Hassio ($Z=108$)
1994: Elemento 110, Elemento 111
1996: Elemento 112

síntesis de elementos **1952** Síntesis de elementos por fusión de núcleos pesados, utilizados como blancos, al ser bombardeados con núcleos ligeros **1974** Síntesis de elementos superpesados usando fusión suave **1996**

de la primera bomba atómica norteamericana, la física nuclear se desarrolló de una manera formidable. Investigadores de Berkeley (California) sintetizaron uno tras otro los elementos neptunio, plutonio, americio, curio, berkelio y californio. Los dos elementos siguientes, einstenio y fermio, fueron descubiertos en 1952, en los desechos de una explosión termonuclear. Haciendo reaccionar los actínidos más pesados producidos en el laboratorio con iones ligeros, pudo ampliarse el sistema periódico hasta el elemento 106. Los elementos más pesados aún sólo pueden ser producidos mediante una fusión suave de núcleos estables de plomo o de bismuto con iones sintéticos semipesados. Entre los años 1981 y 1996 se descubrieron de esta forma en el GSI de Darmstadt los elementos más pesados que se conocen: del 107 al 112.

excitación muy superior a la que se produce en el caso de la absorción de un neutrón. Cierto es que esta energía puede que se disipe por la expulsión de uno o más neutrones, pero lo más probable es que se produzca la desintegración espontánea del núcleo en dos. Es decir, que las posibilidades de construir un nuevo núcleo en un reactor de fusión son mucho más pequeñas que en el caso de la captura de neutrones.

No es fácil manejar, por otro lado, haces de iones pesados de la misma intensidad que los de neutrones. La mayoría de los iones descarga además su energía en una primera capa delgada del material, no siendo capaces de irradiar una muestra voluminosa. Y la grandísima energía de los proyectiles puede hacer que el blanco se caliente más de lo tolerable.

En vista de tales dificultades, además de construir nuevos ciclotrones, se empezó a pensar en utilizar aceleradores lineales para poder llevar a cabo con éxito estos intentos de síntesis. Como fuera que los experimentos requerían el empleo de los actínidos más pesados, sólo pudieron realizarse en los estados poseedores de armas nucleares, que disponían de plantas de producción en cantidades suficientes. Dos fueron los centros de investigación que pusieron manos a la obra, pertenecientes a los dos estados rivales en la época de la guerra fría: la Universidad de California en Berkeley y el Instituto Unido de Investigación Nuclear de Dubna.

Ya en 1955 se consiguió en Berkeley la producción del elemento mendelevio (Md, $Z=101$), por irradiación de 10^9 átomos del isótopo einstenio 253 con partículas alfa. Para la confirmación del elemento se usaron por primera vez procedimientos radioquímicos que permiten detectar la presencia de átomos individuales. De 1961 a 1974 se produjeron entre Berkeley y Dubna, y mediante el uso de iones pesados como proyectiles, cinco elementos más, hasta el de número de orden 106: el nobelio (No, $Z=102$), el lawrencio (Lr, $Z=103$), el rutherfordio (Rf, $Z=104$), el dubnio (Db, $Z=105$) y el seaborgio (Sg, $Z=106$). La intensidad de la confrontación de los dos grupos en aquella época la testimonia el hecho de que durante tiempo se discutiera sobre la prioridad de tales descubrimientos y sobre los nombres dados a los elementos. La cuestión quedó aclarada con la resolución de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada que sancionó los nombres que aparecen arriba.

Desde el punto de vista teórico y con anterioridad a los años cincuenta nada hacía presumir que los elementos más allá del fermio pudiesen ser sintetizados jamás. El modelo aceptado hasta entonces era que los núcleos atómicos estaban formados por los nucleones individuales, del mismo modo que una gota líquida está constituida por átomos (el llamado modelo de la gota líquida) y conforme a él se explicaban hechos como la captura de neutrones o la fisión del núcleo inducida por neutrones. Otra consecuencia que se derivaba de este modelo era que los núcleos cuyo número de orden fuese superior a 100 tenían que desintegrarse espontáneamente.

Otto Haxel y Hans E. Suess habían observado que hay ciertos números de protones, Z, y de neutrones, N, que se encuentran muy representados en los núcleos naturales, deduciendo que sus energías de ligadura tendrían que ser mayores que en el caso de los restantes. Algo parecido se sabía ya de la estructura de las capas atómicas, en que los efectos mecánico-cuánticos hacen que los electrones ocupen determinadas capas de energía, estructura que se traduce luego directamente en la ordenación precisa de los elementos en la tabla periódica y que también

Sección eficaz

Para describir cuantitativamente la probabilidad de que se produzca una reacción entre dos partículas se utiliza el concepto de *sección eficaz*. Esta magnitud representa precisamente la superficie que las partículas se ofrecen entre sí con vistas a la reacción considerada —difusión (*scattering)* o absorción, por ejemplo—. Puede ser mayor o menor que la superficie geométrica de las partículas en cuestión.

Este modelo también puede emplearse para representar la producción de un nuevo elemento por fusión de dos núcleos atómicos más ligeros: a cada uno de los núcleos blanco se le asigna una superficie, que sería como la parte negra de la diana que presenta, y cuya magnitud se elige de tal modo que la fusión sólo se produce si el proyectil da en ella. Tal superficie es entonces la sección eficaz de producción.

La superficie geométrica de un núcleo de plomo es algo superior a los 10^{-24} centímetros cuadrados. Aunque la sección eficaz para la producción de transuránidos por captura de neutrones es superior a ese valor, la sección eficaz de producción usando partículas alfa es inferior. Para las reacciones de fusión destinadas a producir iones pesados de órdenes superiores, mediante iones acelerados ligeros o semipesados, las secciones eficaces de producción se van haciendo cada vez más pequeñas de manera muy rápida; para la fusión del elemento más pesado conocido hasta la fecha, el 112, se obtiene un valor de tan sólo 10^{-36} centímetros cuadrados. Si se tiene en cuenta la magnitud del núcleo blanco, la relación es comparable a la que hay entre un milímetro y un kilómetro cuadrados.

explica la estabilidad de que gozan los gases nobles frente a cualquier tipo de reacción química.

Siguiendo esta analogía, Maria Goeppert-Mayer (1906-1972) y Hans D. Jensen (1907-1973) desarrollaron, cada uno por su parte, el modelo de capas de los núcleos atómicos (por el cual obtuvieron el Premio Nobel de Física en 1963), gracias al que consiguieron explicar cuáles son los números de protones y de neutrones que hacen que una capa esté totalmente ocupada. Ello sucede en el caso de los elementos helio ($Z=2$), oxígeno ($Z=8$), calcio ($Z=20$), níquel ($Z=28$), cinc ($Z=50$) y plomo ($Z=82$), y para los demás núcleos que tengan el mismo número de neutrones. Ulteriores capas cerradas son consecuencia de cálculos adicionales dentro del modelo, y se producen para $Z=114$ así como para $N=126$ y $N=184$. Los núcleos más estables son los llamados isótopos doblemente mágicos, como el helio 4 ($Z=2$, $N=2$), oxígeno 16 ($Z=8$, $N=8$), calcio 40 ($Z=20$, $N=28$) y plomo 208 ($Z=82$, $N=126$).

Los efectos mecánico-cuánticos de la construcción de las capas implicaban que quizá los núcleos fuesen más estables de lo que el modelo de la gota líquida permitía esperar. Así, en 1966 y tras realizar los cálculos consiguientes, se observó que era posible que más allá de la frontera de estabilidad predicha por el modelo de la gota líquida, que se situaba en el fermio ($Z=100$), existiera una denominada isla de estabilidad. Se conjeturaron para el isótopo $^{298}114$ ($Z=114$, $N=184$), cuya configuración es doblemente mágica, como la del plomo-208, propiedades parecidas a las de éste. Tal fue el origen de la idea de los elementos superpesados, que instó la explicación de las propiedades generales y la estabilidad de unos elementos que aún estaban por descubrir.

Síntesis de elementos por medio de fusión suave

En una tal situación y hacia mediados de los años sesenta, Christoph Schmelzer propuso la construcción en Alemania de un acelerador de iones de usos generales. Esta instalación debería permitir también la investigación sistemática de todo tipo de reacciones nucleares que pudiesen contribuir a la producción de elementos superpesados.

La oportunidad que tuvieron los físicos nucleares alemanes de introducirse en este tipo de investigaciones, dominadas hasta entonces por científicos americanos y rusos, cristalizó en diciembre de 1969 con la constitución del Instituto de Investigación en Iones Pesados (GSI) en Darmstadt. En 1975 se instaló allí el acelerador de iones superpesados UNILAC (*Acelerador Universal Lineal*), concebido por Schmelzer. Se trataba del primer aparato de esta clase en el que era posible la aceleración de todo tipo de iones, incluidos los de uranio, a una energía adecuada y de una manera gradual.

Una de las metas de tal investigación era la de alcanzar la isla de elementos estables superpesados teóricamente pronosticada, la cual se hallaría separada del continente de los isótopos conocidos mediante lo que podríamos denominar un pantano de núcleos que se desintegrarían espontáneamente, situados en la región de Z comprendido entre 104 y 112. Sin embargo, lo primero era encontrar el sendero que condujese hasta estos lugares. ¿Hasta qué punto serían fiables las predicciones teóricas a la hora de diseñar los experimentos que condujesen a tal meta? ¿Debía continuarse empleando los métodos tradicionales, más seguros, o sería mejor pensar en nuevos procedimientos, con el riesgo evidente de equivocarse o, cuando menos, de llegar a la meta mucho más tarde que los competidores internacionales?

Al principio todo parecía muy prometedor. Los hipotéticos elementos superpesados debían tener vidas medias grandes, comparables a las del uranio y del torio, así como grandes secciones eficaces de producción, de unos 10^{-25} centímetros cuadrados, de modo que debía ser posible producirlos en cantidades apreciables. Se obtendrían así probablemente nuevos componentes químicos, nuevos materiales cuyas aplicaciones investigar, nuevos átomos para la física atómica y nuevos combustibles para explorar técnicas nucleares de generación de energía. Una gran sección eficaz de producción posibilitaría el desarrollo a largo plazo de nuevos métodos; la sensibilidad, la selectividad y la velocidad de las técnicas experimentales al uso parecían suficientes para lograr tal objetivo.

Tras un tiempo de experimentación y búsqueda internacional, incluido el uso del UNILAC, ya a principios de los años ochenta se vio que la producción de elementos superpesados era difícil y que éstos se desintegraban con vidas medias muy cortas. Todos los intentos de síntesis por fusión nuclear o mediante reacciones inelásticas, de elementos superpesados, o de búsqueda de los mismos en la propia naturaleza fracasaron por completo.

Que pudiese hacerse química alguna con este tipo de elementos se demostró imposible, debido a que sus vidas medias eran demasiado breves y las secciones eficaces de producción demasiado pequeñas. Para la física quedó claro que todas las uniones nucleares resultantes de tales reacciones estaban tan excitadas que se producía su desintegración espontánea. En procesos de producción tan calientes como éstos es imposible que se establezca orden alguno en la estructura nuclear, como el que sería imprescindible para conseguir su estabilización de acuerdo con la teoría de capas; y antes de conseguir el enfriamiento del núcleo producto de la fusión de proyectil y blanco, por emisiones sucesivas de varios neutrones, la probabilidad de que el blanco se descomponga en dos núcleos más ligeros es varios órdenes de magnitud superior a la contraria.

Pese a todo, ya en 1974 Yuri Oganessian y su colaborador Alexander Demin habían hecho un descubri-

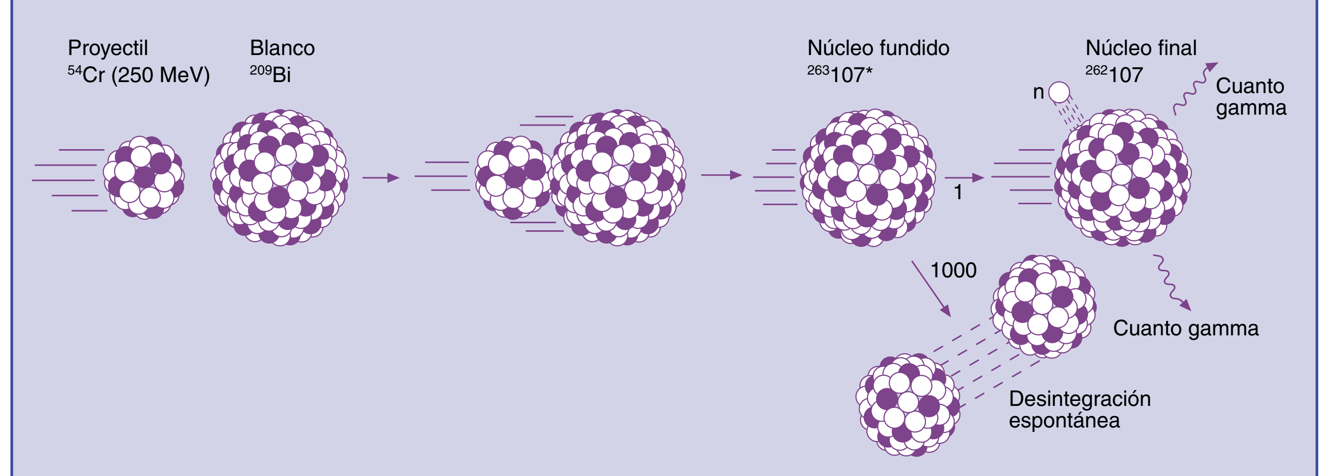
¿Cómo se fabrican los elementos superpesados?

Los elementos cuyo número de orden es muy elevado, $Z > 100$, sólo pueden producirse por fusión de dos núcleos atómicos, lo que se consigue acelerando un haz de iones de los átomos más ligeros hasta que adquieran una energía elevada (unos 250 millones de electronvolt), momento en que se dispara sobre un blanco que contiene los núcleos más pesados. La energía del haz de iones ha de determinarse con gran precisión, ya que, por una parte, los proyectiles tienen que vencer la repulsión electrostática —la barrera de Coulomb— de los núcleos blanco, pero, por otra, no conviene que sea mucho mayor, para evitar que el núcleo resultante de la fusión se rompa de nuevo en otros dos núcleos y no se consiga nada.

Cuando la relación entre las masas de los iones colisionantes es muy asimétrica, es decir, cuando se produce la fusión de un núcleo muy ligero con otro muy pesado, la barrera de Coulomb es menor. Los elementos 101 al 106 fueron sintetizados, así, bombardeando los actínidos más pesados con iones ligeros. Este método fracasa en el caso de los elementos superpesados porque cuanto mayor sea la carga total, mayor es el recalentamiento que sufre el núcleo resultante, lo que le proporciona energías de excitación de entre 40 y 50 millones de electronvolt. Antes de que pueda adquirir una estructura nuclear ordenada tiene que deshacerse sucesivamente de muchos neutrones y cuantos gamma; es muy probable, pues, que prefiera desintegrarse espontáneamente sin aguardar a todo este proceso de enfriado.

Mediante la fusión de plomo o de bismuto con núcleos atómicos semipesados, el núcleo fusionado adquiere una energía de excitación de tan sólo 10 a 20 millones de electronvolt, de modo que puede enfriarse por emisión de un simple neutrón y alcanzar así un estado estable, que previene la desintegración espontánea. Este efecto de estabilización está determinado tan sólo por la estructura de capas del núcleo superpesado. Comparado con el valor que se obtiene usando el modelo de la gota líquida, el valor obtenido da una estabilidad 10^{18} veces superior.

Como material para blancos en esta fusión suave, o fría, los más adecuados son el bismuto 209 y el plomo 208, ambos núcleos esféricos, que son estables debido a las capas llenas obtenidas para $Z = 82$ y $N = 126$. La fuerte ligadura de los nucleones proporciona también un efecto de enfriamiento adicional. Como proyectiles se usan isótopos ricos en neutrones de los elementos calcio a cinc, de números pares de protones y neutrones. Estos núcleos semipesados son las gotas nucleares más fuertemente ligadas; las capas llenas obtenidas para $Z = 20$, $Z = 28$ y $N = 28$ estabilizan aquí la forma esférica del núcleo.



La síntesis de elementos mediante fusión suave tiene varias etapas, aunque puede considerarse un proceso directo, debido a los tiempos de reacción extremadamente breves en que se producen. Los núcleos proyectil y blanco (que aquí son el cromo 54 y el bismuto 209) chocan frontalmente con tanta energía que pueden vencer la repulsión de Coulomb (para lo que en este caso se necesita que sea de 250 millones de electronvolt, MeV). La fuerza de atracción de la interacción nuclear actúa entonces, y la fusión se produce durante un tiempo de unos 2×10^{-20} segundos. El resultado es un núcleo de fusión excitado que, por regla general, vuelve a desintegrarse al cabo de unos 3×10^{-20} segundos. Sólo en uno de entre mil casos, este núcleo elimina su energía de excitación emitiendo un neutrón, convirtiéndose así en un núcleo final estable (que aquí es el bohrio 262).

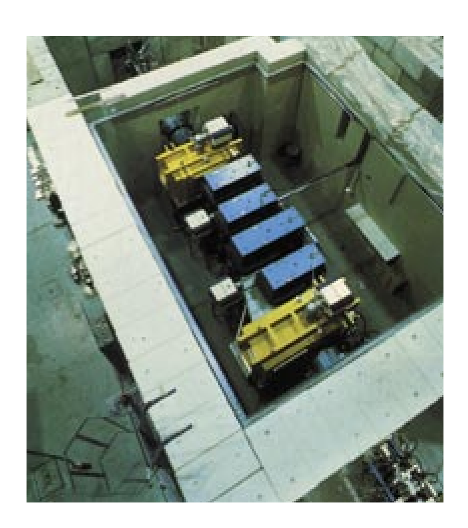
miento revolucionario en Dubna. En lugar de seguir con la irradiación de actínidos pesados con iones relativamente ligeros, como se había hecho hasta entonces, empezaron a acribillar blancos de plomo y de bismuto con iones de argón, consiguiendo así la síntesis del fermio. Oganessian se dio cuenta inmediatamente de que en una reacción de este tipo la energía de excitación del núcleo resultante era mucho menor, de modo que su enfriamiento se conseguía tras la emisión de tan sólo un par de neutrones; y como sea que con cada uno de los neutrones emitidos la probabilidad de rompimiento del núcleo se reduce notablemente, muchos de los núcleos formados llegaban de hecho al final del proceso de producción. Debido al calentamiento mucho menor del núcleo resultante de la fusión, tal proceso recibió el nombre de fusión fría, o suave (la cual nada tiene que ver con la fusión fría que estuvo de moda hace pocos años, producida por fusión de núcleos de deuterio en un cristal reactivo).

Quedaba diseñado así un posible camino a seguir. A favor del GSI jugaba además el hecho de que tanto el plomo como el bismuto fuesen elementos naturales de los que podía disponerse y utilizarlos en el acelerador sin el menor problema. Por el contrario, los institutos de Berkeley y de Dubna, que eran los únicos que podían utilizar actínidos previamente obtenidos mediante sus reactores, despreciaban la fusión suave, a la que no consideraban más que como un proceso curioso. Los colegas americanos opinaban incluso que tal procedimiento nunca podría desembocar en un método de síntesis de nuevos elementos, debido a que combinaciones tan pesadas de proyectil y blanco no llegarían nunca a fusionarse correctamente, al no poder vencer la barrera de Coulomb.

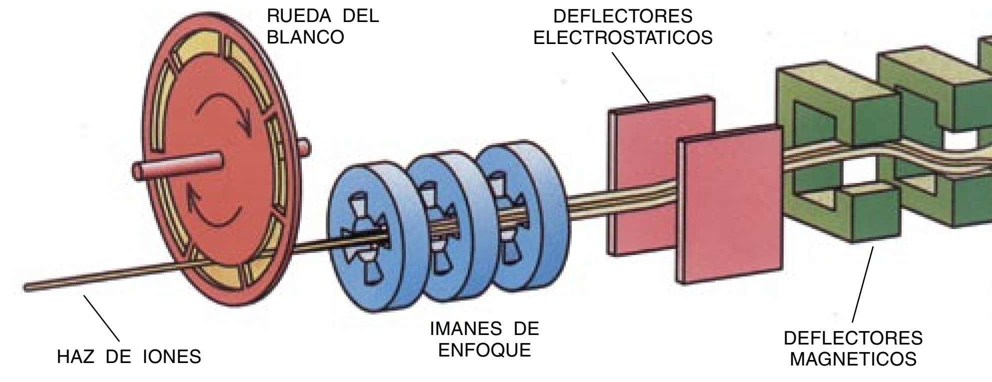
Echando la vista atrás, podemos reconocer ahora otras tres circunstancias que contribuyeron decisivamente a nuestro éxito. Con su cadena de resonadores individuales, el UNILAC fue el primero que, de entre las instalaciones de su clase, hizo posible el empleo de cualquier tipo de iones como proyectiles, así como el gobierno de sus energías con precisión suficiente como para hacer repetibles los experimentos a voluntad. A ello vino a unirse la disponibilidad del filtro de velocidades SHIP (*Separador de Productos de Reacción de Iones Pesados*), construido en colaboración con el Segundo Instituto de Física de la Universidad de Giessen, bajo la dirección de Gottfried Münzenberg. Ambos formaban en 1975 el tándem apropiado para el análisis preciso de los productos de la fusión. Tal identificación precisa hizo posible, en fin, el empleo de una técnica de correlación especialmente diseñada para el proceso.

Inseparable de la identificación de un nuevo elemento superpesado es la determinación rápida y precisa de su actividad. Los procedimientos empleados consistían en la medición del tiempo requerido para el desplazamiento de los iones resultantes entre los lugares de producción y de análisis, lo que se realizaba midiendo su velocidad de flujo en gases, sus tiempos de difusión en superficies sólidas o la velocidad angular de ruedas, situadas en la estación detectora como colectoras de los productos de la reacción nuclear. Pero pueden medirse tiempos de separación menores si se utiliza la gran velocidad de vuelo de los productos de la reacción nuclear, resultantes del efecto de retroceso producido en la misma, y que es de unas cuantas centésimas de la velocidad de la luz.

Ya en los años sesenta, o sea, antes de la construcción del GSI, se habían instalado espectrómetros de nuevo cuño, capaces de separar los productos de fisión, en los reactores alemanes de Garching y de Jülich, así como en el Instituto Laue-Langevin de Grenoble. La experiencia adquirida en la construcción de tales espectrómetros de efecto de retroceso, cuyos componentes desvían los iones mediante el uso de campos eléctricos y magnéticos, fue esencial en la construcción de los filtros de velocidades para los productos de fusión de nuestro reactor. Los tiempos







3. COMPONENTES PRINCIPALES del experimento gsi para la búsqueda de elementos superpesados. El rayo de iones generado en el acelerador UNILAC, cuya intensidad es de unas 3×10^{12} partículas por segundo, incide sobre las láminas de la rueda-blanco (*izquierda*), la cual gira sincrónicamente con los pulsos del rayo, al objeto de repartir el calentamiento sobre una superficie mayor. Por otra parte, casi todos los iones atraviesan las láminas blanco sin pérdida significativa de energía. Sólo en muy raras ocasiones sucede que un núcleo proyectil se funda con un núcleo blanco. El núcleo ligado así formado

de separación obtenidos con el SHIP vienen determinados por el tiempo de vuelo a través del espectrómetro y son inferiores a 10^{-6} segundo.

Como consecuencia de la conservación del impulso en el choque, los productos de la reacción vuelan con velocidad considerable en la dirección del rayo; la cinemática de fusión se reduce, por tanto, a un pequeño dominio angular, lo cual tiene sus ventajas con vistas a un análisis experimental. De todos modos hay que tomar unas precauciones muy especiales para poder separar los verdaderos productos de la fusión —cuya frecuencia aproximada es de un acontecimiento por semana— del flujo de proyectiles que provoca el rayo —unas 3×10^{12} partículas por segundo volando en la misma dirección—. Acoplando dos dispositivos separadores, el SHIP reduce el número de proyectiles y de todos los demás productos de la reacción en un factor de 10^{11}, dejándolos en unos pocos por segundo. Por el contrario, la probabilidad de que los codiciados productos de la fusión alcancen el foco del espectrómetro casi sin pérdidas es del 40 por ciento; eso es posible, en particular, porque los núcleos resultantes de la fusión suave emiten inmediatamente un neutrón, lo que modifica ligeramente su velocidad.

El SHIP pronto demostró ser un instrumento ideal para comprobar con precisión el resultado del proceso de fusión en sí mismo y la naturaleza de los núclidos producidos. Las cortas vidas medias de los productos de la fusión no constituyeron un problema. Mediante la construcción de un sistema de blancos rotatorios a la entrada del filtro de velocidades fue posible utilizar a fondo todo el enorme flujo de radiación del UNILAC. El uso de sistemas detectores especiales a la salida del SHIP ha permitido aumentar la sensibilidad en varios órdenes de magnitud.

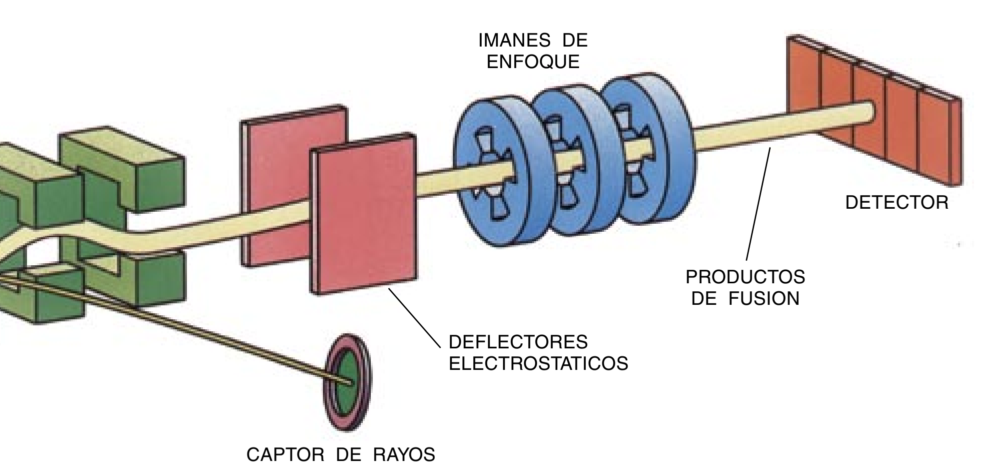
La velocidad de todas las partículas pesadas, tras la doble selección que realiza el espectrómetro, vuelve a medirse a la salida del SHIP, por cálculo directo del tiempo de vuelo. Por último van a parar a un contador de silicio, que registra su posición de impacto y su energía. La combinación de las determinaciones de tiempo de vuelo y de energía hace posible una primera determinación, poco precisa, de su masa, que sin embargo resulta suficiente a la hora de separar proyectiles, núcleos blanco en retroceso y productos de la fusión. Pueden medirse así secciones eficaces efectivas de 10^{-31} centímetros cuadrados sin que sea necesario recurrir a las propiedades precisas de la desintegración posterior. Muy pocos de los espectrómetros empleados en física nuclear han conseguido nunca una sensibilidad tan grande.

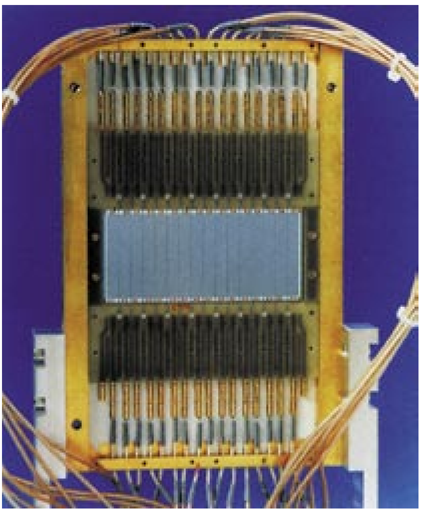
Para la identificación de un isótopo resulta imprescindible correlacionar tales propiedades características de la desintegración observada experimentalmente con las de todos los posibles candidatos, ordenados uno tras otro. Las desintegraciones alfa y la emisión espontánea de los núcleos que llegan al detector de silicio se miden en función de su posición, tiempo y energía. Las desintegraciones correlacionadas de un núcleo dado poseen las mismas coordenadas espaciales en el contador. Cuanto más cortas sean las vidas medias, tanto más evidente es la correlación.

Este método es una especie de reloj capaz de medir vidas medias de valores comprendidos entre pocos microsegundos y muchos minutos —separadas por más de 9 órdenes de magnitud—. La desintegración de un isótopo nuevo, hasta ahora desconocido, debe poder correlacionarse de manera muy precisa con las propiedades conocidas de las generaciones sucesivas. Hemos podido observar cadenas de desintegración hasta la sexta generación. La probabilidad de que tal suceso sea aleatorio puede determinarse a partir de los datos conocidos del contador; se obtienen probabilidades de aleatoriedad inferiores a 10^{-16}, lo cual significa que en el caso de registrar un suceso por día, deberíamos esperar unas mil edades del universo en promedio para que obtuviésemos un suceso aleatorio.

Los elementos 107, 108 y 109

Gracias a esta técnica de correlación, nuestro grupo de trabajo consiguió demostrar de manera concluyente en 1980 que la fusión suave funciona. Por irradiación de plomo 208 con titanio 50 se obtuvo el núcleo ligado $^{258}104$, el cual se transformó, por emisión de un neutrón, en el ya





vuela en la misma dirección, aunque algo más despacio, que los otros iones y productos de reacción, y atraviesa los dos campos de deflexión eléctricos y los cuatro campos de deflexión magnéticos del filtro de velocidades ship (*en el medio y foto superior*), que tiene una longitud total de once metros. Mientras que el rayo de iones es desviado hacia un captor de rayos, los núcleos ligados se dirigen hacia un detector de silicio, el cual registra el punto de incidencia y la energía de los núcleos, así como las características de las partículas alfa que se emiten a continuación.

conocido rutherfordio 257. Esa demostración convenció definitivamente a los que aún permanecían escépticos ante la posibilidad de liberación de un neutrón individual por parte del núcleo fusionado. Aun así, casi nadie pensaba entonces que el método pudiese llevarse mucho más allá y resultar útil.

Pero en los cuatro años siguientes nuestro grupo, formado por Gottfried Münzenberg, Fritz-Peter Hessberger, Sigurd Hofmann, Matti E. Leino, Willbrord Reisdorf, Karl-Heinz Schmidt y yo mismo, demostró de manera irrefutable el descubrimiento de los elementos 107, 108 y 109.

Para empezar, nos habíamos embarcado en la síntesis del elemento 107 (que luego ha sido bautizado como bohrio, en honor del físico danés Niels Bohr, el fundador del moderno modelo atómico). Para ello fueron precisas minuciosas labores de preparación. Helmut Folger y su grupo desarrollaron una técnica de blancos especial: láminas extremadamente delgadas de bismuto 209 se sujetaron a una rueda, que giraba de manera sincrónica con los pulsos de un rayo de iones, a unas mil revoluciones por minuto, de tal forma que el calor depositado por los iones al chocar se distribuía en una superficie mucho mayor. Una vez que Schmidt hubo desarrollado la técnica de correlación y la hubo probado en rayos conocidos de partículas alfa, y después de que Hofmann construyese un detector de silicio con sensibilidad espacial, el sistema de reconocimiento de productos de la fusión estuvo a punto en 1978. Su enorme poder de discriminación espacial permitió la localización precisa de los productos de fisión de núcleos madre, mientras que su sensibilidad a la energía hizo posible su identificación, por comparación de las energías de fisión y vidas medias medidas con los datos correspondientes a núclidos ya conocidos.

Como proyectil empleamos cromo 54 ($Z = 24$), que hubo que enriquecer, pues la mezcla de isótopos que ofrece la naturaleza no contiene más de un 2,4 por ciento. Debido al elevado precio resultante, no disponíamos de material más que para un experimento, que debía durar unas dos semanas. Esperábamos conseguir un suceso por día en promedio.

El 24 de febrero de 1981 todo estaba a punto. Sobre las cadenas de desintegración alfa conseguimos poner de manifiesto la presencia de los primeros núcleos del elemento 107. Cuarenta y dos años después del descubrimiento del francio y tras 16 elementos consecutivos descubiertos en los Estados Unidos, por fin se había vuelto a identificar uno en Europa. Con hierro 58 ($Z = 26$), que posee dos protones y dos neutrones más que el cromo 54, y usando de nuevo blancos de bismuto 209, conseguimos obtener 18 meses más tarde el elemento 109 (que ha sido posteriormente bautizado con el nombre de meitnerio, en honor de la física Lise Meitner). Este elemento se identificó a partir de una única cadena de desintegración. Hasta 1988 no se pudo realizar un segundo experimento y comprobar definitivamente el resultado.

¿Por qué nos habíamos saltado el elemento 108? Había buenas razones para ello. Por entonces aún se mantenía la leyenda del pantano de desintegración espontánea entre los elementos conocidos y todos los elementos superpesados, que debían constituir una isla de estabilidad. Los núcleos con un número impar de protones y de neutrones, como el bohrio 262 ($Z = 107$, $N = 155$) y el meitnerio 266 ($Z = 109$, $N = 157$), deberían ser más resistentes frente a la fisión espontánea que los núcleos de números de nucleones pares. Ello habría significado que el elemento 108 se desintegraría con una vida media más corta, por lo que no podría ser detectado por nuestro dispositivo (que era demasiado lento para ello).

Esta idea empezó a venirse abajo cuando Demin y sus colaboradores de Dubna mostraron en 1983 que los experimentos de síntesis del seaborgio ($Z = 106$) sólo pueden comprenderse si se hace la hipótesis de que todos los isótopos producidos de este elemento sean emisores de partículas alfa, y que la desintegración espontánea observada se produce en su isótopo hijo rutherfordio ($Z = 104$). En un subsiguiente experimento logramos demostrar esto de manera concluyente: los isótopos seaborgio 259, 260 y 261 no se desintegran espontáneamente, sino que siempre lo hacen emitiendo una partícula alfa.

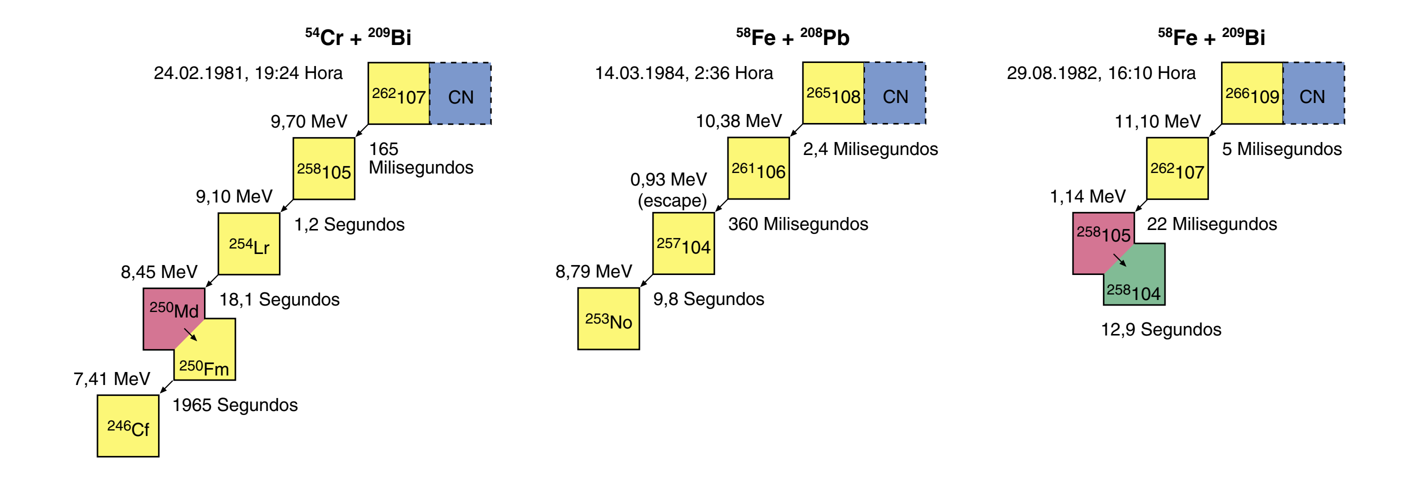
La leyenda del pantano de inestabilidad quedó aniquilada del todo cuando el 14 de marzo de 1984 descubrimos el elemento 108 (al que se dio el nombre de hassio, que viene de la denominación latina de Hessen, *Hassia,* la región de Alemania en que se halla el GSI). Esta vez obtuvimos tres núcleos del isótopo hassio 265, los cuales por emisión sucesiva de partículas alfa terminan en el nobelio 253. El seaborgio 260 ($Z = 106$, $N = 154$) y el hassio 264 ($Z = 108$, $N = 156$) también emiten partículas alfa, siendo por tanto más estables que el rutherfordio frente a la desintegración espontánea. Esto sólo pudo entenderse en función de una elevada energía de capas, que permite disminuir la energía del estado fundamental.

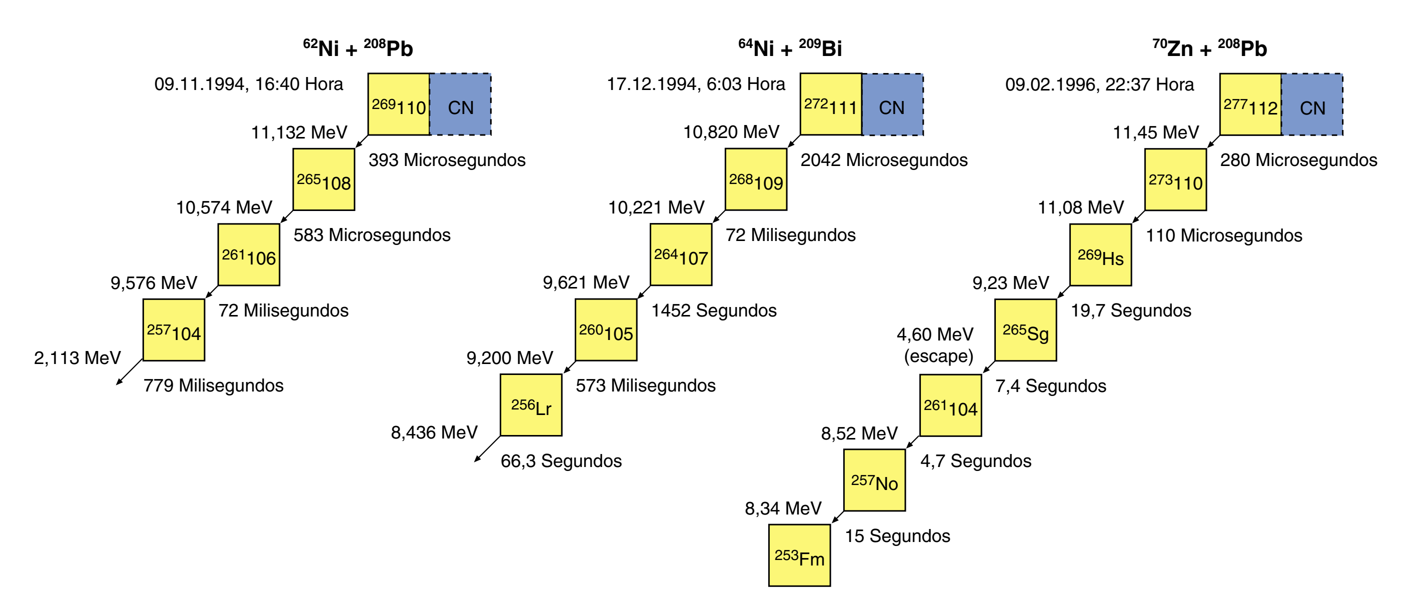
Los elementos bohrio, hassio y meitnerio no tendrían ninguna estabilidad como gotas líquidas. Sólo la ordenación mecánico-cuántica de sus nucleones en niveles de energía discretos les protege de la desintegración espontánea; poseen unas barreras de desintegración elevadas. Esa era precisamente una propiedad que se predecía para los elementos superpesados en torno al $^{298}114$. También las cadenas de desintegración alfa, que terminan en una desintegración espontánea, muestran una estabilidad en aumento contra la desintegración espontánea, lo que es otro rasgo característico de la isla de estabilidad. Esto era si cabe más patente por el hecho de que nosotros mismos habíamos podido obtener ya tres miembros de este grupo de elementos superpesados, pese a que sus vidas medias eran en principio de sólo unos pocos milisegundos.

La razón de que ya en la región comprendida entre $Z = 107$ y $Z = 109$ se produjese esta inesperada estabilidad se encontró pronto en los experimentos. Un primer cálculo de las energías de capa de los isótopos pertenecientes al primitivo pantano de desintegración espontánea indicó que dichos núcleos no poseían forma esférica, sino que eran deformes, como un pequeño barril con los cantos suavizados. Consecuencia de ello es que los niveles de energía, que en el caso de la simetría esférica son ocupados por muchos nucleones a la vez, se separan en varios subniveles, de manera tal que algunos ascienden a energías mayores, mientras que otros caen a energías mas bajas. Esa separación de niveles se modifica al variar la deformación del núcleo y trae como consecuencia que la energía de capas de un núcleo ligeramente deformado pueda ser menor que la de otro esférico, lo cual implica mayor estabilidad.

Los elementos 110, 111 y 112

En 1988 el GSI empezó la construcción de un nuevo sistema de aceleración, así que durante los cuatro años siguientes el UNILAC no proporcionó ningún chorro de





4. CADENAS DE DESINTEGRACION registradas correspondientes al bohrio ($Z = 107$), hassio ($Z = 108$) y meitnerio ($Z = 109$), así como a los elementos todavía sin nombre: 110, 111 y 112. En cada caso se dan las energías de la reacción de síntesis, los tiempos de registro precisos, así como los tiempos de correlación de las partículas alfa emitidas sucesivamente (que no hay que confundir con las vidas medias de los núcleos formados) y las energías de desintegración en millones de electronvolt (megaelectronvolt, MeV). Todos los elementos pudieron liberar su energía de excitación emitiendo un solo neutrón del núcleo de fusión (que se designa como CN, por *compound nucleus*, o núcleo compuesto).

iones pesados que permitiese efectuar síntesis de elementos. Como sea que aún estábamos interesados en ello, debíamos aprovechar aquel lapso de tiempo para mejorar la sensibilidad de todo nuestro equipamiento experimental, ya que la probabilidad de producción de los núcleos disminuye con su número de orden. Entre el nobelio ($Z = 102$) y el meitnerio ($Z = 109$) disminuye en un factor 3,5 por cada elemento. La producción media de meitnerio había sido de un átomo cada dos semanas de irradiación continuada.

¿Podía confiarse aún en la utilidad de la fusión suave? Los investigadores de Berkeley y de Dubna habían reemprendido sus experimentos de bombardeo de actínidos, sin parar atención en los resultados que nosotros habíamos obtenido en los intentos llevados a cabo hasta entonces, por lo que durante esa época no tuvimos ningún competidor que usase el nuevo método. Mediante el empleo de variaciones constructivas pudimos multiplicar por tres la intensidad de los rayos del UNILAC, al paso que incrementábamos también en similar medida la sensibilidad del SHIP y sus detectores.

En el ínterin la composición de nuestro equipo había variado. Además de Hofmann, Münzenberg, Hessberger, Folger, Leino y yo, trabajaban ahora con nosotros Viktor Ninov y Hans-Joachim Schött, así como Andrei G. Popeko, Alexander V. Yeremin y Andrei N. Andreiev, del Centro de Investigación Nuclear de Dubna, y Stefan Saro y Rudolf Yanik, de la Universidad Comenius de Bratislava (Eslovaquia).

Cuando en 1993 regresamos al laboratorio, todos los preparativos para nuestro experimento de medida de secciones eficaces de producción de 10^{-36} centímetros cuadrados habían concluido; y tras tan larga pausa experimental se nos concedieron largos tiempos de radiación para nuestros nuevos intentos. Empezamos las pruebas con rayos de argón 40 y titanio 50, con los que pudimos descubrir y estudiar los isótopos más ligeros del mendelevio y del rutherfordio. Para poder extrapolar a la energía necesaria para la planeada síntesis del elemento 110, efectuamos primero diversos ensayos, usando entre otros hierro 58 y plomo 208 para efectuar las fusiones. El éxito de

las mejoras en nuestros aparatos era patente: en lugar de las tres cadenas de desintegración obtenidas durante el descubrimiento del hassio, ahora pudimos registrar 75.

Tras una pausa de más de diez años, el 9 de noviembre de 1994 pudimos volver a identificar por fin un elemento desconocido: en la fusión del níquel 62 con plomo 208, tras la emisión de un neutrón, el núcleo resultante se había transformado en el isótopo ^{269}110, que tuvo que ser identificado por medio de su cadena de desintegración, constituida toda ella por núclidos hijos ya conocidos. Se registraron cuatro de tales cadenas. Obtuvimos luego más cadenas de desintegración, nueve en total, por fusión del isótopo de níquel estable más pesado, el Ni-64, con plomo 208, que dieron lugar a ^{271}110, cuyos núclidos hijos eran así mismo todos conocidos. La sección eficaz de producción de esta reacción era de 15×10^{-36} centímetros cuadrados, es decir, cuatro veces superior a la de producción de ^{269}110.

Poco después, el 17 de diciembre de 1994 —día en que se celebraba el 25 aniversario de la fundación del GSI— se descubrió el elemento 111, por irradiación de bismuto 209 con níquel 64; se obtuvieron tres cadenas de desintegración del isótopo ^{272}111. En las generaciones cuarta y quinta de la cadena fueron identificados los elementos dubnio 260 y lawrencio 256, respectivamente. Las vidas medias de los nuevos isótopos meitnerio 268 y bohrio 264 de la cadena son, como se esperaba, más largas que las correspondientes a los isótopos de los mismos elementos conocidos hasta entonces, más ligeros. La vida media del propio ^{272}111 es de 1,5 milisegundos; la sección eficaz de producción de ese isótopo cayó ya hasta los $3{,}5 \times 10^{-36}$ centímetros cuadrados.

Se planeó un nuevo experimento con el proyectil cinc 70, que es muy rico en neutrones —con la esperanza de que obtuviéramos un incremento de la sección eficaz parecido al que logramos con el paso del níquel 62 al níquel 64—. Ensayos previos con proyectiles de hierro 58 y de níquel 64 nos permitieron tener una idea de la energía necesaria para la fusión de cinc 70 y plomo 208. En febrero de 1996 —cien años después de que Becquerel observase la radiactividad natural, que conmocionó los cimientos de la física, y quince años después de nuestro primer descubrimiento de un nuevo elemento artificial, el bohrio— conseguimos finalmente identificar el elemento 112 en dos cadenas de desintegración. La sección eficaz de producción era extraordinariamente pequeña, de tan sólo 1×10^{-36} centímetros cuadrados.

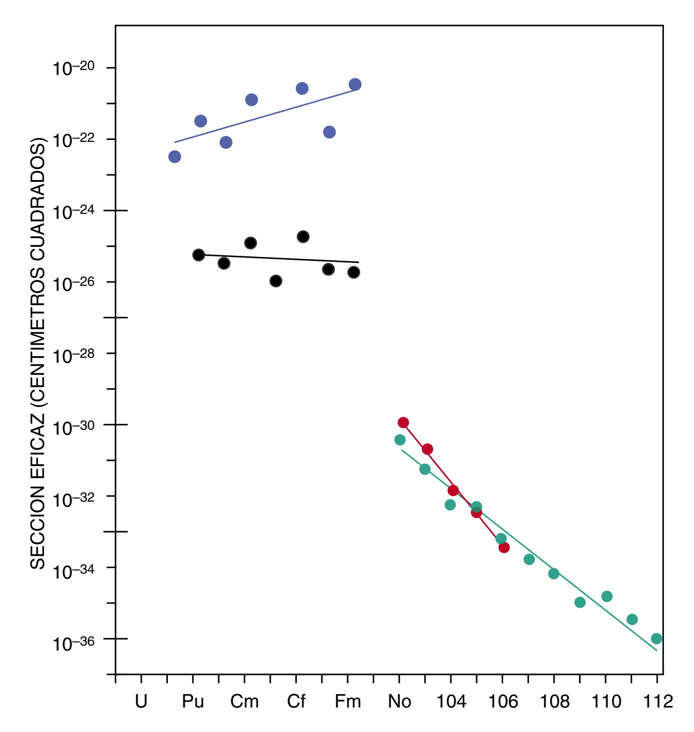
Por emisión sucesiva de seis partículas alfa, el isótopo ^{277}112 se desintegra en el fermio 253. Mientras que ya se conocían los tres primeros componentes de esta cadena de desintegración (la más larga de las observadas hasta entonces), se obtuvieron en ella los nuevos isótopos ^{273}110 y hassio 269. Esa cadena de desintegración fue también la primera que conducía más allá de la capa completa con 162 neutrones. Hay que atribuir a la mayor estabilidad resultante de ello el hecho de que la vida media del núcleo intermedio hassio 269 (que contiene 161 neutrones) sea significativamente más larga. Por otro lado, la elevada energía que adquiere la partícula alfa correspondiente a esta emisión es claramente observable e identifica el hecho de que se haya cruzado una capa completa.

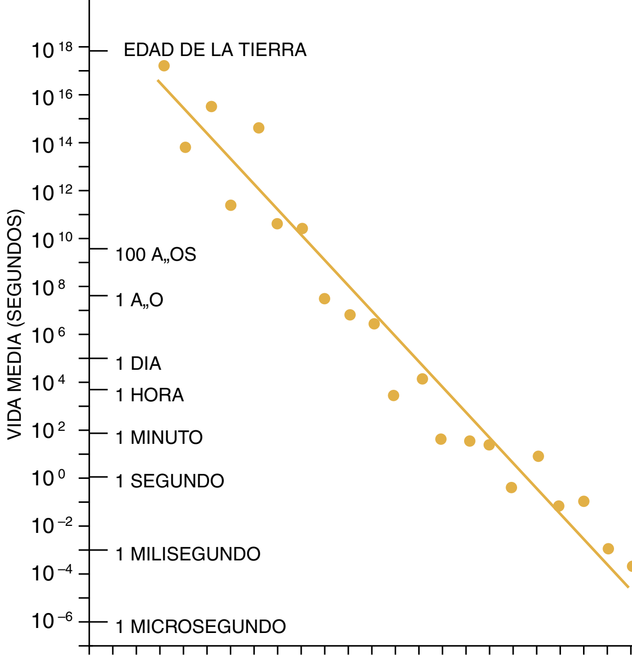
NUMERO DE PROTONES	NOMBRE DADO por la IUPAC
109	Meitnerio (Mt)
108	Hassio (Hs)
107	Bohrio (Bh)
106	Seaborgio (Sg)
105	Dubnio (Db)
104	Rutherfordio (Rf)

	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
											112						277 0,24 ms
										111			272 1,5 ms				
									110		269 0,17 ms		271 1,1 ms / 56 ms		273 0,076 ms / 118 ms		
								109	266 3,4 ms		268 70 ms						
							108	264 0,45 ms	265 0,8 ms / 1,7 ms		267 33 ms		269 9,3 s				
					107	261 11,8 ms	262 8,0 ms / 102 ms		264 440 ms								
			106	258 2,9 ms	259 0,48 s	260 3,6 ms	261 0,23 s		263 0,3 s / 0,9 s		265 7,1 s	266 34 s					
		105	256 2,6 s	257 1,3 s	258 4,4 s		260 1,5 s	261 1,8 s	262 34 s	263 27 s							
	104	254 0,022	255 1,4 s	256 6,7 ms	257 4,7 s	258 12 ms	259 3,1 s	260 21 ms	261 65 s	262 47 ms / 1,2 s							

NUMERO DE NEUTRONES

5. PORCION DEL MAPA DE NUCLIDOS que abarca los isótopos más pesados conocidos hasta el presente. El tipo de transición está codificado mediante colores: la emisión alfa en amarillo, la desintegración espontánea en verde y la captura de neutrones en rojo. Más allá del elemento 104, cuyos isótopos dotados de un número par de nucleones se desintegran espontáneamente todos ellos, la mayoría son emisores de núcleos alfa. Decaen sucesivamente en el elemento 104, donde la cadena de desintegración se rompe al producirse su desintegración espontánea. Tal propiedad había sido pronosticada en los años sesenta para todos los elementos superpesados.





6. SECCIONES EFICACES DE PRODUCCION (*a la izquierda*) y vidas medias de los isótopos de vida más larga (*a la derecha*) de cada uno de los transuránidos sintéticos. Los elementos neptunio ($Z = 93$) a fermio ($Z = 100$) pueden ser producidos en reactores, por medio de captura de neutrones (*en azul*), y en ciclotrones, por bombardeo con partículas alfa (*en negro*). Los elementos posteriores al mendelevio ($Z = 101$) sólo pueden producirse mediante reacciones de fusión con iones ligeros (*en rojo*) o con iones semipesados (*en verde*), respectivamente.

¿Cuál es el siguiente paso?

Se conocen actualmente 27 isótopos de los elementos que están por encima del rutherfordio ($Z = 104$); 19 de ellos fueron sintetizados en Darmstadt, cinco en Berkeley y tres en Dubna. Casi todos son emisores de partículas alfa, es decir, más estables frente a la desintegración espontánea que los isótopos del rutherfordio y del nobelio ($Z = 102$). El hecho de que hayan podido ser descubiertos y estudiados se lo debemos a la estructura interna de sus núcleos: la ordenación mecánico-cuántica de sus sistemas de nucleones hace bajar la energía del estado fundamental, de modo que se obtiene una energía de ligadura adicional. Sin este efecto de estabilización de capas no podrían existir.

Los elementos descubiertos en el GSI muestran todas las características que en los años sesenta se atribuyeron a los elementos superpesados. Que se trate de hecho de tales elementos es una cuestión mucho más delicada, que sólo podrá ser respondida adecuadamente merced a ulteriores observaciones de las propiedades de sus estados fundamentales. En lugar del pantano de desintegración espontánea que separa los elementos conocidos de la supuesta isla de estabilidad constituida por otros de mayor número de protones y neutrones, hemos descubierto y transitado un pequeño istmo, unido a la tierra firme.

De acuerdo con los cálculos, de $Z = 107$ a 124 y de $N = 154$ hasta 185, se extiende una región con más de 300 núcleos estabilizados por capas, que no podrían existir como gotas nucleares. En las proximidades del hassio 270 y a lo largo del número de neutrones $N = 162$, todos los núcleos son deformes; la confirmación experimental directa de este hecho queda aún lejos de nuestro alcance. En torno a $N = 170$ los núcleos retoman de nuevo la forma esférica. Existen además isótopos ligeros de un mismo elemento superpesado que son esféricos, deformados y pesados. Estos últimos podrían exhibir vidas medias más largas para elementos más allá de $Z = 110$. Pero, dado que tienen un número de neutrones más alto, estos isótopos más estables son más difíciles de obtener por medio de la fusión nuclear. Todos los intentos de síntesis de los mismos han fracasado hasta el momento.

La producción de los elementos 113 y 114 será dificultosa; es de esperar que las secciones eficaces de producción seguirán descendiendo respecto a las obtenidas hasta ahora. Durante los dos próximos años intentaremos la síntesis del isótopo $^{278}113$ mediante la fusión de cinc 70 y bismuto 209, y del isótopo $^{283}114$ por fusión de germanio 76 y de plomo 208. Nos preparamos a enfrentarnos con tiempos de medición de varios meses, en los que para el elemento 114 ni siquiera está asegurada la obtención de un solo átomo.

Está por ver cuál sea el primer elemento para el que falle el método de la fusión suave. Pero se ha encontrado la región de los elementos superpesados, cuyo aspecto es bastante distinto de lo que se suponía en 1966, y se tiene a tiro al elemento 114 por vez primera. Poder sintetizarlo treinta años después de que fuera postulado constituiría un éxito grandioso de la física de la estructura nuclear.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SCHWERIONENFORSCHUNG. Rudolf Bock, Günter Herrmann y Günter Siegert. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1993.

CHEMISTRY OF THE TRANSACTINIDE ELEMENTS. M. Schädel, en *Radiochimica Acta*, vol. 70/71, págs. 207-223, 1995.

MODERN ALCHEMIE. DIE JAGD NACH DEN SCHWERSTEN ELEMENTEN. Gottfried Münzenberg y Matthias Schädel. Vieweg, Brunswig, 1996.

La nube de Oort

Allende el sistema solar hay una nube inmensa de cometas sometidos no sólo a las fuerzas de nuestro astro sino también de otras estrellas. En su dinámica podría esconderse la clave de las extinciones en masa del pasado de la Tierra

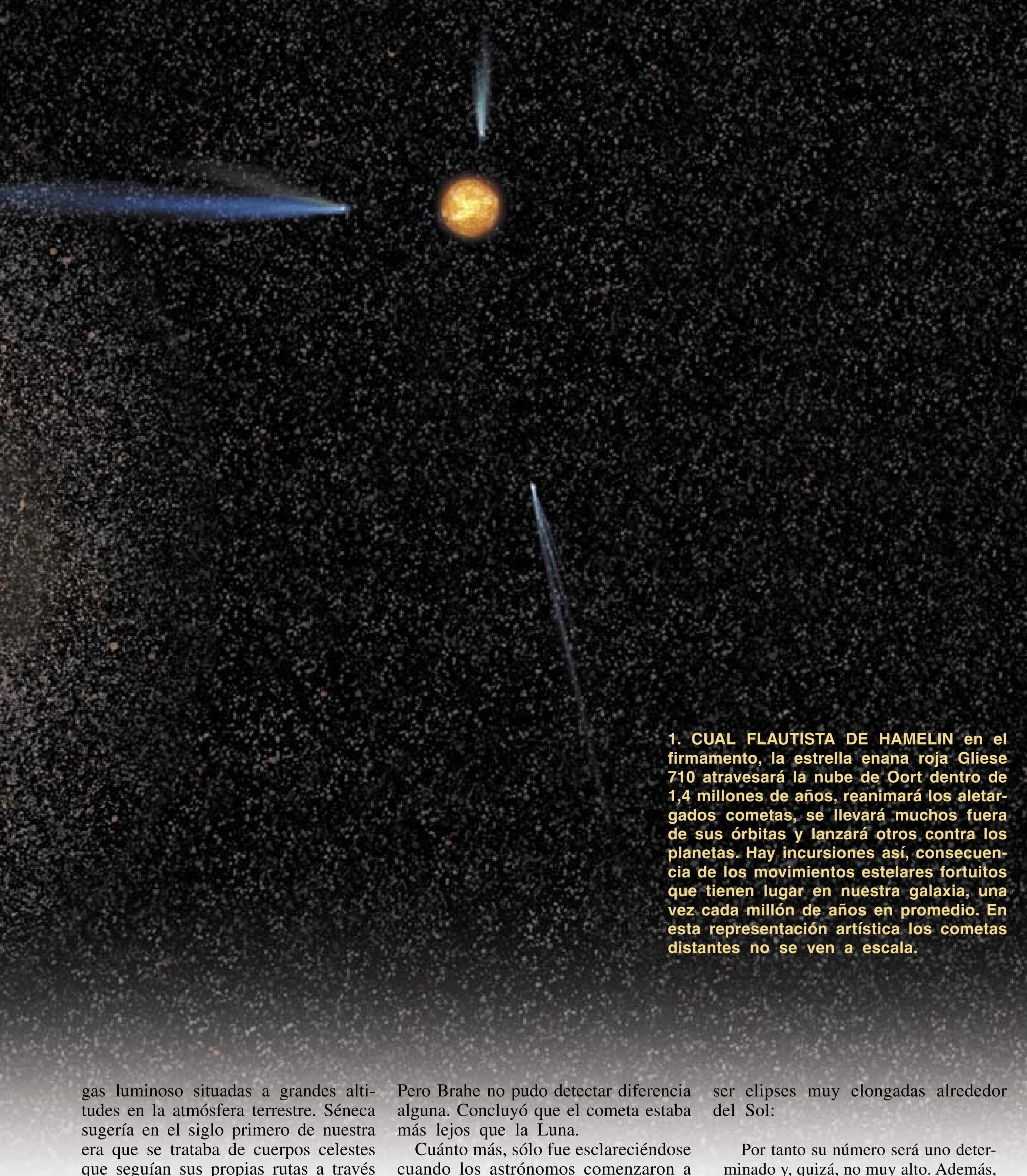
Paul R. Weissman

No es todavía infrecuente oír o leer que el sistema solar se acaba en la órbita del planeta más alejado: Plutón. Craso error. La influencia gravitatoria del Sol se extiende 3000 veces más allá, a medio camino hasta las estrellas más cercanas. Y ese espacio no está vacío: lo ocupa un gigantesco depósito de cometas, material sobrante de la formación del sistema solar. A ese almacén se le denomina nube de Oort.

También pudiera llamársele la Siberia del sistema solar. Se trata de una frontera, enorme y fría, poblada con los exiliados del imperio interior del Sol y apenas sometida a la autoridad central. Las temperaturas no rebasan a mediodía los cuatro grados Celsius sobre el cero absoluto. Los cometas vecinos distan entre sí decenas de millones de kilómetros, por lo común. El Sol es aún la estrella más brillante del firmamento, pero no luce más que Venus en el atardecer terrestre.

Nunca hemos "visto" la nube de Oort, pero tampoco se ha visto jamás un electrón. Deducimos la existencia y propiedades de la nube de Oort y del electrón a partir del efecto físico que observamos, que en el caso de aquélla es el flujo continuo de cometas de largo período que se adentran en el sistema planetario. La existencia de la nube de Oort ofrece respuesta a las cuestiones que desde la antigüedad han venido inquietando al hombre: ¿Qué son los cometas? ¿De donde proceden?

Aristóteles conjeturó, ya en el siglo IV a.C. que los cometas eran nubes de



1. CUAL FLAUTISTA DE HAMELIN en el firmamento, la estrella enana roja Gliese 710 atravesará la nube de Oort dentro de 1,4 millones de años, reanimará los aletargados cometas, se llevará muchos fuera de sus órbitas y lanzará otros contra los planetas. Hay incursiones así, consecuencia de los movimientos estelares fortuitos que tienen lugar en nuestra galaxia, una vez cada millón de años en promedio. En esta representación artística los cometas distantes no se ven a escala.

gas luminoso situadas a grandes altitudes en la atmósfera terrestre. Séneca sugería en el siglo primero de nuestra era que se trataba de cuerpos celestes que seguían sus propias rutas a través del firmamento. Transcurrieron quince siglos antes de que su hipótesis fuera confirmada por Tycho Brahe, quien comparó las observaciones del cometa de 1577 hechas desde distintos puntos de Europa; si hubiera pasado más cerca, su posición con respecto a las estrellas hubiese sido algo distinta en cada uno. Pero Brahe no pudo detectar diferencia alguna. Concluyó que el cometa estaba más lejos que la Luna.

Cuánto más, sólo fue esclareciéndose cuando los astrónomos comenzaron a calcular las órbitas cometarias. Edmund Halley compiló en 1705 el primer catálogo, con 24 cometas. Las observaciones eran harto toscas, por lo que el astrónomo inglés hizo bastante con ajustar parábolas aproximativas a la trayectoria de cada uno. No obstante, defendió que las órbitas podían ser elipses muy elongadas alrededor del Sol:

> Por tanto su número será uno determinado y, quizá, no muy alto. Además, el Espacio entre el Sol y las Estrellas fijas es tan inmenso, que hay suficiente Hueco para que pueda girar un cometa, por grande que sea su Período de Revolución.

La descripción de Halley de los cometas, cuyas órbitas se alargan hasta



2. EL COMETA HALE-BOPP, cuya máxima cercanía a la Tierra se produjo en marzo de 1997, ejemplifica los cometas de largo período. Visitó por ultima vez el sistema solar interior hace 4200 años. Debido a la influencia gravitatoria de Júpiter volverá a aparecer dentro de 2600 años. En el ínterin, se alejará del Sol 370 veces la distancia que separa a éste de la Tierra. Al igual que muchos cometas de largo período, Hale-Bopp tiene una órbita muy inclinada: su plano es casi perpendicular al de la órbita de la Tierra (*recuadro*).

tocar las estrellas, fue en cierto sentido precursora del hallazgo de la nube de Oort, dos siglos y medio más tarde. Halley mostró también que los cometas de 1531, 1607 y 1682 presentaban órbitas muy similares, espaciadas a intervalos de unos 76 años. Esos cometas, aparentemente distintos, eran en realidad, anunció, uno solo, que regresaba a intervalos regulares. La última vez que ese cuerpo celeste, denominado ahora cometa Halley, se asomó a la región de los planetas interiores fue en 1986.

Desde la época de Halley los astrónomos han clasificado los cometas en dos grupos según el tiempo que tardan en girar alrededor del Sol (directamente relacionado con la distancia promedio entre el cometa y el Sol): los cometas de largo período, como los recientes y brillantes Hyakutake y Hale-Bopp, presentan períodos orbitales de más de 200 años; los de corto período, menos de 200. De unos diez años a esta parte se subdividen los cometas de corto período en los de la familia de Júpiter —Encke y Tempel 2, por ejemplo— con períodos de menos de 20 años, y los de período medio, o de tipo Halley, con períodos entre 20 y 200 años.

PAUL R. WEISSMAN, experto en dinámica cometaria, trabaja en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena. Tiene a su cargo los proyectos de investigación de la misión *Deep Space 4/Champollion* de la NASA, que se posará en Tempel 1 en el año 2005.

Estas definiciones, aunque algo arbitrarias, reflejan diferencias reales. Los cometas de períodos largo y medio se incorporan en el sistema planetario de forma aleatoria desde todas las direcciones, mientras que los cometas de la familia de Júpiter tienen órbitas con planos inclinados por lo general no más de 40 grados con respecto al plano de la eclíptica, la órbita terrestre. (Las órbitas de los otros planetas también están muy cerca del plano de la eclíptica.) Parece que los cometas de períodos largo y medio provienen de la nube de Oort; los de la familia de Júpiter se originan en el cinturón de Kuiper, una región de la eclíptica más allá de la órbita de Neptuno.

A principios del siglo XX se disponía ya de un número suficiente de órbitas cometarias de largo período y podía abordarse su distribución estadística. Surgió un problema: alrededor de un tercio de todas las órbitas osculatrices —descritas por los cometas en el punto de mayor aproximación al Sol— eran hiperbólicas. Este tipo de órbitas se origina en el espacio interestelar y vuelve a él, a diferencia de las elípticas, ligadas al Sol por la gravedad. Apoyados en las órbitas hiperbólicas, algunos sugirieron que los cometas procedían del espacio interestelar y los capturaban sus encuentros con los planetas.

A fin de examinar esta hipótesis, los expertos en mecánica celeste extrapolaron, o “integraron”, las órbitas de los cometas de largo período hacia atrás en el tiempo. Vieron que debido a los fuertes tirones gravitatorios de los planetas distantes las órbitas osculatrices no coincidían con las órbitas originales de los cometas. Cuando se halló una explicación de los efectos de los planetas —al integrar lo suficientemente atrás en el tiempo y orientar las órbitas en relación, no al Sol, sino al centro de masa del sistema solar (la suma del Sol y de todos los planetas)— casi todas las órbitas se convirtieron en elípticas. Por tanto, los cometas eran miembros del sistema solar, no vagabundos interestelares.

Además, pese a que dos tercios de estas órbitas mostraban una distribución uniforme, las energías orbitales de un tercio caían dentro de un estrecho pico. Esa punta abarcaba órbitas que cubrían enormes distancias, 20.000 unidades astronómicas (20.000 veces la distancia entre la Tierra y el Sol) o más; órbitas con períodos que superaban el millón de años.

¿Por qué tantos cometas venían de tan lejos? A finales de los años cuarenta Adrianus F. van Woerkom demostró que la distribución uniforme podía atribuirse a la dispersión aleatoria de los cometas, en órbitas mayores o menores, causada por las perturbaciones planetarias. Pero, ¿qué ocurre con el pico de cometas con períodos de un millón de años?

En 1950 Jan H. Oort —famoso ya por haber determinado en los años veinte la rotación de la Vía Láctea— se interesó por este problema. Comprendió que el pico de un millón de años era una manifestación de la fuente de los cometas de largo período: una gigantesca nube esférica que rodease al sistema planetario y

se extendiera hasta mitad de camino de las estrellas más cercanas.

Oort demostró que los cometas de esta nube están ligados al Sol de un modo tan débil, que las estrellas que por azar pasan muy cerca de ellos modifican fácilmente sus órbitas. Al menos una docena se acercan a un parsec del Sol (206.000 unidades astronómicas) cada millón de años. Estos encuentros bastan para sacudir las órbitas cometarias, aleatorizar sus inclinaciones y generar una corriente, lenta y continua, de cometas hacia el sistema solar interior, con unas órbitas elípticas muy elongadas. Cuando entran en el sistema planetario por primera vez, los cometas son dispersados por los planetas, que aumentan o menoscaban sus energías orbitales. Algunos cometas se exilian del sistema solar para siempre, pero los demás regresan y son observados integrados en la distribución uniforme. Oort describió la nube como "un jardín que las perturbaciones estelares siegan delicadamente".

Parecía todavía que unos cuantos cometas provenían del espacio interestelar, una impresión incorrecta generada por pequeños errores en la determinación de sus órbitas. Además, las órbitas de los cometas se desvían porque los chorros de gas y polvo que surgen de su superficie helada actúan como pequeños cohetes a medida que se acercan al Sol. Tales fuerzas no gravitatorias pueden hacer que las órbitas parezcan hiperbólicas cuando en realidad son elípticas.

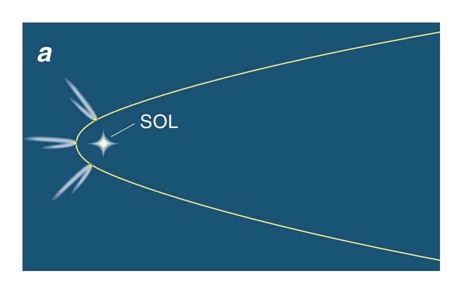
El logro de Oort, haber interpretado correctamente la distribución orbital de los cometas de largo período, resalta más si consideramos que sólo disponía de 19 órbitas bien medidas para trabajar. (Hoy los astrónomos multiplican por 15 ese material de partida.) Y sabemos que los cometas de largo período que aparecen en la región planetaria por primera vez provienen de una distancia media de 44.000 unidades astronómicas. Tales órbitas tienen períodos de 3,3 millones de años.

Las perturbaciones estelares no siempre son tan delicadas. A veces una estrella se acerca tanto al Sol, que atraviesa de lleno la nube de Oort y remueve violentamente las órbitas cometarias que encuentra en su camino. Estadísticamente se espera que pase una estrella a 10.000 UA del Sol cada 36 millones de años y a 3000 UA cada 400 millones. Los cometas que se hallen en las cercanías de la trayectoria de la estrella se verán bruscamente desplazados hacia el espacio interestelar; en el conjunto de la nube las órbitas sufren cambios sustanciales.

Pese a que los encuentros con estrellas no ejercen ningún efecto directo sobre los planetas —la menor distancia a la que se espera que se acerque una estrella al Sol durante toda su historia es de 900 unidades astronómicas—, pueden acarrear efectos indirectos devastadores. En 1981, Jack G. Hills sugería que el paso de una estrella a corta distancia podría generar una lluvia de cometas sobre los planetas que aumentaría el ritmo de los impactos cometarios en ellos, ocasionando quizás la extinción en masa de seres vivos en la Tierra. Según las simulaciones por ordenador que realicé en 1985 con Piet Hut, durante una "lluvia" podrían pasar hasta trescientas veces más cometas de lo normal. La lluvia duraría entre dos y tres millones de años.

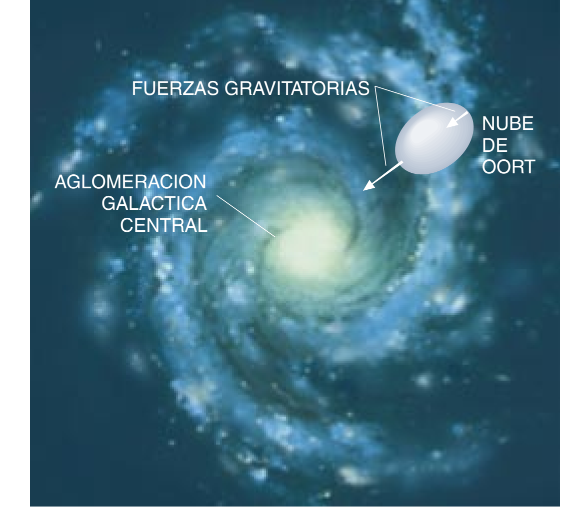
Recientemente, Kenneth A. Farley y sus compañeros del Instituto de Tecnología de California encontraron pruebas de una lluvia de cometas así. Como indicador de la presencia de materia extraterrestre se sirvieron del helio 3, isótopo harto escaso, y representaron gráficamente la acumulación con el tiempo de partículas de polvo interplanetario en los sedimentos oceánicos. Se considera que la tasa de acumulación de polvo refleja el número de cometas que atraviesan la región planetaria; cada uno desprende polvo en su camino. Farley descubrió que la tasa aumentó bruscamente al final del Eoceno, hace unos 36 millones de años, para disminuir poco a poco durante dos o tres millones de años, tal y como predicen los modelos teóricos de las lluvias cometarias. El final del Eoceno se relaciona con un fenómeno de extinción biológica leve; varios impactos de cráteres se atribuyen a esa época. Los geólogos han encontrado también otros indicios de impacto en sedimentos terrestres, como capas de iridio y microtectitas.

¿Hay peligro de que sobre la Tierra se desencadene hoy una lluvia de cometas? No. Joan García Sánchez, Robert A. Preston y Dayton L. Jones y el autor han reconstruido las trayectorias de las estrellas cerca del sistema solar a partir de sus posiciones y velocidades medidas por el satélite Hipparcos. Hemos encontrado pruebas de que una estrella ha pasado cerca del Sol en el último millón de años. Dentro de 1,4 millones de años lo hará una pequeña enana roja, Gliese 710, que atravesará la parte exterior de la nube de Oort a unas 70.000



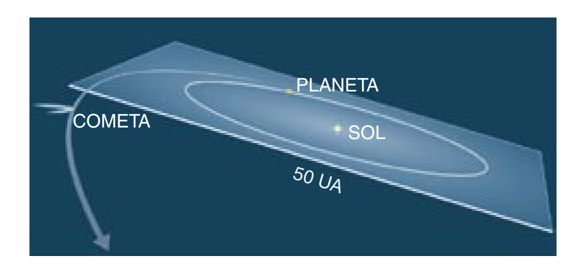


3. UN COMETA de largo período está ligado al Sol de un modo tan débil que los planetas ejercen una influencia decisiva sobre él. Sólo será visible mientras su trayectoria se doble alrededor del Sol. Al aplicar las leyes de Kepler de los movimientos celestes y dibujar su trayectoria —su órbita aparente u osculatriz— a menudo parece que el cometa siga una trayectoria hiperbólica, lo que querría decir que procede del espacio interestelar y regresará allí (*a*). Cálculos más refinados, que tienen en cuenta los planetas (especialmente Júpiter), llegan a la conclusión de que la órbita es en realidad elíptica (*b*). Se modifica cada vez que atraviesa el sistema solar interior.

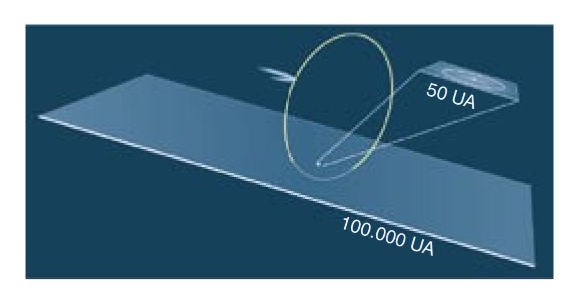


4. LAS FUERZAS DE MAREA surgen porque la gravedad disminuye con la distancia. La aglomeración central de nuestra galaxia —la concentración de estrellas en el centro de la espiral— tira con mayor fuerza en el lado más cercano a ella de la nube de Oort (no a escala) que en el más lejano. El plano galáctico ejerce una fuerza similar pero en otra dirección. Las mareas galácticas son análogas a las lunares; se explican éstas por el tirón gravitatorio que sufre la cara de la Tierra próxima a la Luna, mayor que el experimentado por la opuesta.

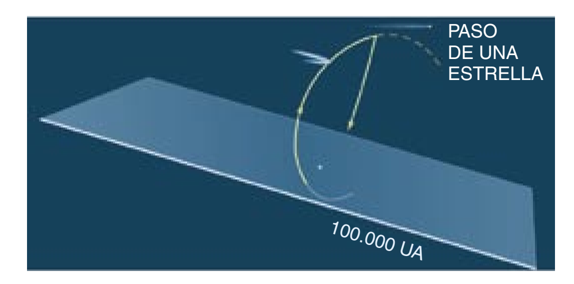
unidades astronómicas del Sol. A esa distancia, Gliese 710 podría aumentar en un 50 por ciento la frecuencia de incursiones de cometas en el sistema solar interior.



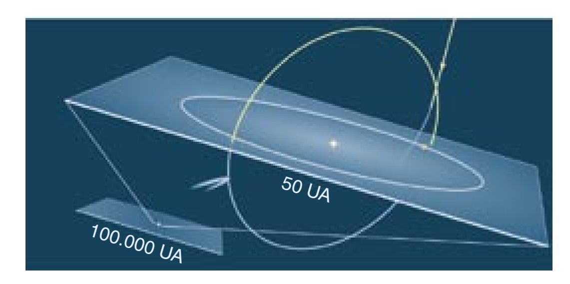
5. UN COMETA DE LARGO PERIODO comienza su historia cuando se forma cerca de los planetas y es catapultado por éstos hacia una órbita más amplia.



Allí el cometa es sensible a las fuerzas gravitatorias de las estrellas y nubes moleculares que por azar pasen cerca; se halla expuesto además a las fuerzas de marea del disco y núcleo galácticos. Estas fuerzas inclinan aleatoriamente el plano orbital del cometa y paulatinamente lo van arrastrando afuera.



Mas allá de una distancia de unas 20.000 unidades astronómicas (20.000 veces la distancia entre el Sol y la Tierra), las distintas influencias externas pueden lanzar el cometa de nuevo hacia los planetas.



Una vez que el cometa torna al sistema solar interior, los planetas pueden empujarlo hacia una nueva órbita, que hará que reaparezca a intervalos regulares.

Además del paso aleatorio de estrellas, la nube de Oort sufre los efectos perturbadores de otros dos fenómenos. En primer lugar, la nube es lo suficientemente grande como para que sean perceptibles en ella las fuerzas de marea generadas por el disco de la Vía Láctea y también, aunque en menor grado, por el núcleo galáctico. Estas mareas surgen porque el Sol y un cometa de la nube no distan lo mismo del plano medio del disco o del centro galáctico y, por tanto, difiere ligeramente la intensidad de la atracción gravitatoria que sufren. Las mareas contribuyen a introducir nuevos cometas de largo período en la región planetaria.

En segundo lugar, las nubes moleculares gigantes de la galaxia podrían perturbar la nube de Oort; lo sugería en 1978 Ludwig Biermann, del Instituto Max Planck de Munich. Esas nubes ingentes de hidrógeno frío, donde nacen estrellas y sistemas planetarios, tienen masas entre 100.000 y un millón de veces la del Sol. Cuando el sistema solar se acerca demasiado a una, las perturbaciones gravitatorias que se producen arrastran los cometas fuera de sus órbitas y los lanzan hacia el espacio interestelar. Estos encuentros, muy violentos, sólo se producen una vez entre 300 y 500 millones de años. En 1985, Hut y Scott D. Tremaine mostraron que a lo largo de la historia del sistema solar el efecto acumulado de las nubes moleculares es del orden del efecto de todas las estrellas que han pasado por sus aledaños.

Tres son las cuestiones planteadas a propósito de la nube de Oort: cuál es la estructura de la nube, a cuántos cometas aloja y dónde se originaron éstos. En 1987 Tremaine, Martin J. Duncan y Thomas R. Quinn estudiaron la redistribución de los cometas en el interior de la nube de Oort promovida por las perturbaciones de estrellas y nubes moleculares. Los cometas del borde exterior se pierden en seguida, bien hacia el espacio interestelar, bien hacia el interior del sistema solar, como consecuencia de las perturbaciones. A mayor profundidad debe de haber un núcleo denso que poco a poco va rellenando los confines.

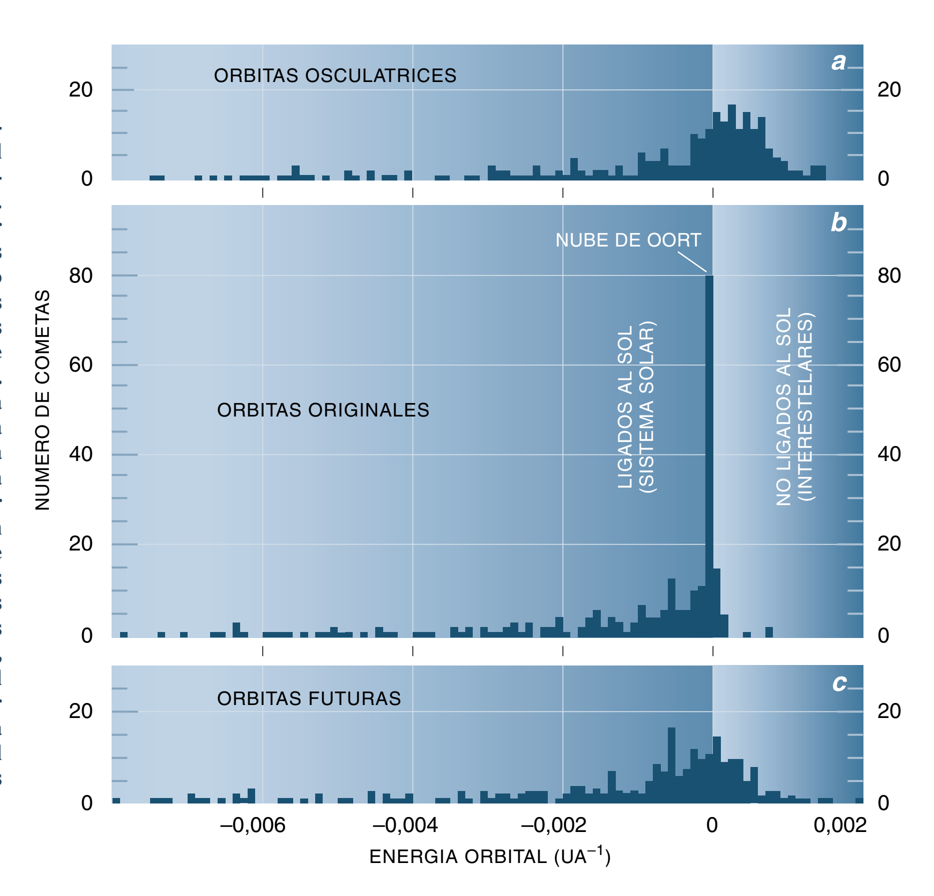
Tremaine, Duncan y Quinn también demostraron que, conforme los cometas se desvanecen de la nube de Oort, sus inclinaciones orbitales tienden a permanecer inalteradas. En eso se apoyan ahora los astrónomos para defender que corresponde al cinturón de Kuiper (y no a la nube de Oort) la explicación de los cometas de baja inclinación pertenecientes a la familia de cometas de Júpiter. No obstante, la nube de Oort es la fuente más probable de los cometas de mayor inclinación y período medio, como el Halley y el Swift-Tuttle. Fueron cometas de largo período que los planetas arrastraron a órbitas de corto período.

¿Cuántos cometas se alojan en la nube de Oort? La cifra depende de la frecuencia con la que los cometas de la nube escapan al espacio interplanetario. Conforme a la cifra observada de cometas de largo período, los astrónomos ahora calculan que contiene seis billones de cometas; son, pues, los cuerpos de algún tamaño más abundantes del sistema solar. Sólo una sexta parte pertenece a la nube externa y dinámica que describió Oort; el resto están en el núcleo, más denso. Si se aplica la mejor estimación realizada hasta el momento de la masa media de un cometa —40.000 millones de toneladas métricas—, resulta que la masa total de los cometas de la nube de Oort es en el momento actual unas 40 veces la de la Tierra.

¿Dónde se originaron los cometas de la nube de Oort? No se formaron en su posición actual, pues el material existente a esas distancias es tan escaso, que no podría agregarse. Tampoco nacieron en el espacio interestelar; la captura de cometas por parte del Sol es ineficaz. El único lugar que nos queda es el sistema planetario. Oort conjeturó que los cometas se crearon en el cinturón de asteroides y fueron expulsados por los planetas gigantes durante la formación del sistema solar. Pero los cometas son cuerpos helados, bolas enormes de nieve sucia; en el cinturón de asteroides la temperatura es demasiado elevada para que se condensen fragmentos de hielo.

Transcurrido un año tras el artículo de Oort de 1950, Gerard P. Kuiper, de la Universidad de Chicago, propuso que la materia se agregaba formando cometas más lejos del Sol, en las cercanías de los planetas gigantes. (El cinturón de Kuiper fue bautizado con el nombre de este investigador porque sugirió que algunos cometas se constituyeron allende las órbitas planetarias más distantes). A buen seguro, se originarían cometas por toda la región de los planetas gigantes, pero se sostenía que los que se

6. LA ENERGIA ORBITAL de los cometas de largo período conocidos, tal como muestran estos histogramas, desvela la presencia de la nube de Oort. Los astrónomos comienzan por calcular las órbitas que describirían los cometas si su movimiento estuviera causado sólo por la gravedad del Sol, las llamadas órbitas osculatrices. Un tercio de estas órbitas tiene energía positiva, lo que hace que parezcan interestelares (*a*). Ahora bien, incorporada la influencia de los planetas y extrapolando hacia atrás en el tiempo, la energía resulta ser ligeramente negativa, lo que indica que vienen del borde del sistema solar (*b*). Algunos cometas todavía parecen interestelares, pero esto posiblemente sea consecuencia de pequeños errores observacionales. Mientras los planetas siguen ejerciendo su influencia, algunos cometas regresarán a la nube de Oort, otros se fugarán del sistema solar y el resto volverán a visitar el sistema solar interior (*c*). Técnicamente, la energía orbital es proporcional al recíproco del semieje mayor expresado en unidades astronómicas inversas (UA^{-1}).



crearon cerca de Júpiter y Saturno (los dos planetas de mayor masa) debieron de ser expulsados al espacio interestelar; no era probable, en cambio, que Urano y Neptuno, con masas inferiores, diesen trayectorias de escape a tantos cometas. La investigación en dinámica acaba de arrojar una sombra de duda sobre esta hipótesis. Júpiter y, sobre todo, Saturno conducen una parte importante de sus cometas a la nube de Oort, en una cuantía menor quizá que Urano y Neptuno, lo que pudo haberse compensado con la cantidad mayor de material que al principio poblaba las zonas de los planetas mayores.

Cabe, pues, que los cometas de la nube de Oort provengan de un amplio intervalo de distancias solares y, por tanto, de intervalo notable de temperaturas de formación. Ese fenómeno podría explicar la diversa composición de los cometas. En un trabajo reciente con Harold E. Levison hemos puesto de manifiesto que la nube podría contener asteroides procedentes de la región de los planetas interiores. Compuestos de roca, más que de hielos, estos objetos constituyen de un 2 a un 3 por ciento de la población total de la nube de Oort.

La clave de estas ideas es la presencia de los planetas gigantes, que arrojan los cometas hacia el exterior y modifican sus órbitas si alguna vez vuelven a introducirse en la región planetaria. Otras estrellas con planetas gigantes podrían contar con sus nubes de Oort. Si todas las estrellas tienen nubes de Oort, cuando pasen cerca del Sol éstas atravesarán la nuestra. Aun así, no menudearán las colisiones entre cometas, pues el espacio interpuesto viene a ser de una unidad astronómica o más.

Las nubes de Oort que rodean a cada estrella podrían estar liberando paulatinamente cometas hacia el espacio interestelar. De pasar cerca del Sol, estos cometas interestelares deberían reconocerse, porque se aproximarían al sistema solar a velocidades mucho mayores que los procedentes de nuestra nube de Oort. Hasta la fecha no se ha detectado ningún cometa interestelar, lo que no debe sorprendernos ya que el sistema solar es un blanco muy pequeño en la inmensidad del espacio interestelar y la probabilidad de que alguna vez se haya visto uno es del cincuenta por ciento.

La nube de Oort sigue fascinando a los astrónomos. Gracias a la mecánica celeste, la naturaleza ha preservado en ese lejano almacén una muestra de material que data de la formación del sistema solar. Su estudio, y el de las pistas cosmoquímicas que han quedado congeladas en cada uno de sus helados componentes, permite a los investigadores conocer valiosos datos sobre el origen del sistema solar.

Se están preparando varias misiones espaciales para despejar estas incógnitas. La nave *Stardust*, cuyo lanzamiento está previsto para el próximo año, atravesará la coma del cometa Wild 2, recogerá muestras de polvo cometario y las traerá a la Tierra para su análisis en el laboratorio. Dentro de algunos años, la sonda CONTOUR se acercará a tres cometas para comparar sus composiciones. La misión *Deep Space* 4/*Champollion* enviará una sonda orbital y un vehículo de aterrizaje al cometa Tempel 1, mientras que la misión *Rosetta* hará lo mismo con el cometa Wirtanen.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMETS IN THE POST-HALLEY ERA. Dirigido por Ray L. Newburn, Jr., Marcia Neugebauer y Jurgen Rahe. Kluwer Academic Publishers, 1991.

DYNAMICS OF COMETS: RECENT DEVELOPMENTS AND NEW CHALLENGES. Julio A. Fernández en *Asteroids, Comets, Meteors 1993: Actas del Simposio 160 de la Unión Astronómica Internacional*. Dirigido por A. Milani, M. Di Martino y A. Cellino. Kluwer Academic Publishers, 1994.

COMPLETING THE INVENTORY OF THE SOLAR SYSTEM. Dirigido por Terrence W. Rettig y Joseph M. Hahn. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 107; 1996.

La técnica termofotovoltaica

La conversión en electricidad del calor radiado puede demostrar su aptitud para alumbrar poblaciones remotas o propulsar automóviles

Timothy J. Coutts y Mark C. Fitzgerald

Suele llamarse fotovoltaica la técnica de obtención de electricidad a partir de la luz solar. Sin duda, la radiación procedente de la parte visible del espectro es abundante, gratuita y limpia. Pero también la radiación infrarroja —por ejemplo, el calor generado por la combustión del gasóleo— puede proporcionar energía eléctrica en cantidades útiles.

Esta última técnica de conversión, llamada termofotovoltaica, ofrece una gran ventaja en ciertas circunstancias: los generadores podrán funcionar de noche o con cielos nublados, evitando tener que almacenar electricidad en baterías. Por varios motivos resulta esta técnica preferible a la tradicional de quemar combustible fósil en centrales térmicas. Su rendimiento —porcentaje de energía del combustible transformada en electricidad— puede superar notablemente al de los generadores eléctricos alimentados con gas natural u otro combustible fósil. Además, puede diseñarse un sistema termofotovoltaico basado en semiconductores en el que la emisión de contaminantes sea mínima. Y, por si fuera poco, al no contener piezas móviles, operará de un modo fiable y silencioso, con muy poca necesidad de mantenimiento.

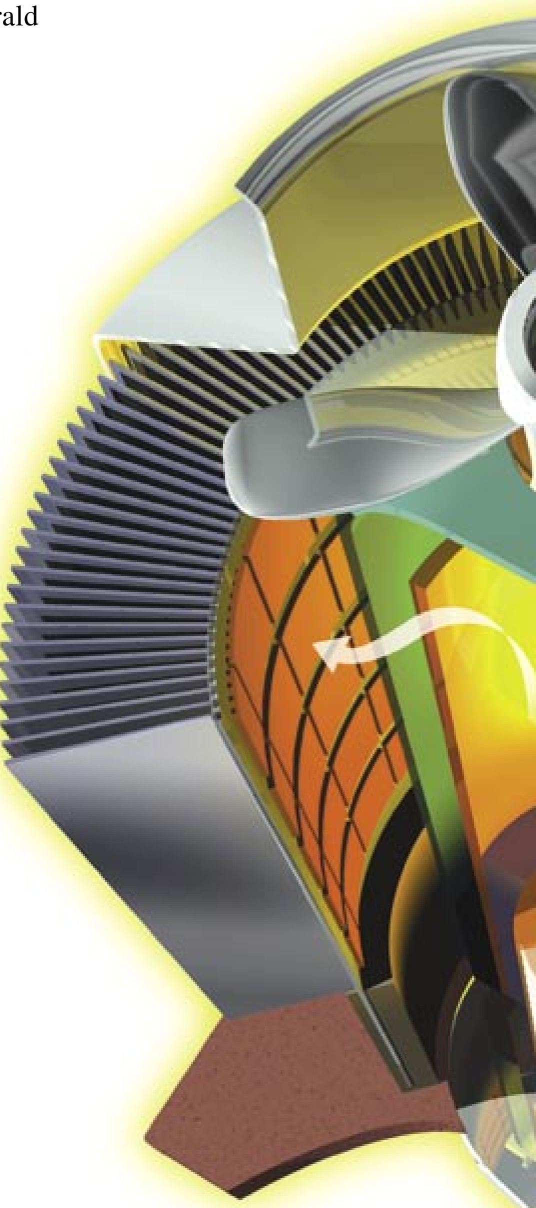
Pese a las cualidades señaladas, la técnica termofotovoltaica no ha alcanzado el éxito de la fotovoltaica solar, que hoy ocupa un próspero segmento del mercado de la energía. Pero la convergencia puede ser rápida, ya que la técnica proviene de la misma investigación que dio origen a las células solares y parece estar llegando a su mayoría de edad.

Los fundamentos teóricos de la conversión termofotovoltaica se remontan 40 años atrás. Pierre Aigrain, de la Escuela Normal Superior de París, describió los conceptos básicos en una serie de conferencias en 1956. A comienzos de los sesenta, el Ejército norteamericano construyó en Fort Monmouth el primer prototipo de generador termofotovoltaico. Pero su rendimiento no llegó ni al 1 por ciento, y se necesitaba un mínimo del 10 al 15 por ciento para poder utilizar los generadores en operaciones de campaña.

A finales de los setenta y principios de los ochenta, los trabajos promovidos y realizados por el Instituto de Investigaciones de la Energía Eléctrica en Palo Alto, el Instituto de Investigaciones del Gas en Chicago, la Universidad de Stanford y otras entidades lograron ciertas mejoras en las prestaciones. Pero en los primeros sistemas los componentes nunca transmitían el calor suficiente a las unidades que convierten en electricidad la energía de la radiación infrarroja. Sólo la reciente obtención de nuevos materiales ha logrado sacar esta técnica de la fase de ensayo.

Están a punto de salir al mercado los productos termofotovoltaicos. Una empresa va a comercializar un generador termofotovoltaico para alimentar el equipo eléctrico en barcos de vela. Entre otras aplicaciones en desarrollo figuran unos pequeños generadores para dar suministro eléctrico en zonas remotas o a tropas en marcha. También podría esta técnica utilizarse en la propulsión de vehículos eléctricos

TIMOTHY J. COUTTS y MARK C. FITZGERALD llevan muchos años dedicados a energías renovables y técnicas conexas. Coutts estudió en el Politécnico de Newcastle, donde se doctoró en física de películas delgadas en 1968. Ahora se halla adscrito al Centro Nacional Fotovoltaico del NREL en Golden. Fitzgerald preside la empresa Science Communications.



1. GENERADOR TERMOFOTOVOLTAICO, que transforma el calor radiado en electricidad. El quemador (*centro*) genera calor, cuyos fotones infrarrojos inciden en el radiador (*recinto verde*). El radiador dirige ciertas longitudes de onda infrarrojas a redes de células fotovoltaicas (*rejilla*), que convierte a electricidad la energía.

híbridos, en los que la batería eléctrica complementa la potencia obtenida de un motor de combustión. En último término, podrían producirse cientos de megawatts por medios termofotovoltaicos, con lo que se cubrirían necesidades del servicio público o se aumentarían los recursos energéticos de la industria al recuperar el calor desprendido en los procesos fabriles.

La producción de electricidad a partir del calor radiado requiere varios elementos funcionales. Ha de haber una fuente de calor y, acoplada a ésta, un radiador, un material que emita radiaciones infrarrojas en las longitudes de onda deseadas. Debe construirse un dispositivo semiconductor consistente en una red de células interconectadas, el cual habrá de convertir las radiaciones de esas longitudes de onda en electricidad, que luego se envía a un circuito para realizar una aplicación útil, como pudiera ser alimentar un refrigerador a bordo de un barco. Por último, para operar de modo rentable, el sistema termofotovoltaico debe devolver la energía no consumida al radiador. En ciertos casos, la energía desperdiciada puede servir para calefacción ambiental u otros fines.

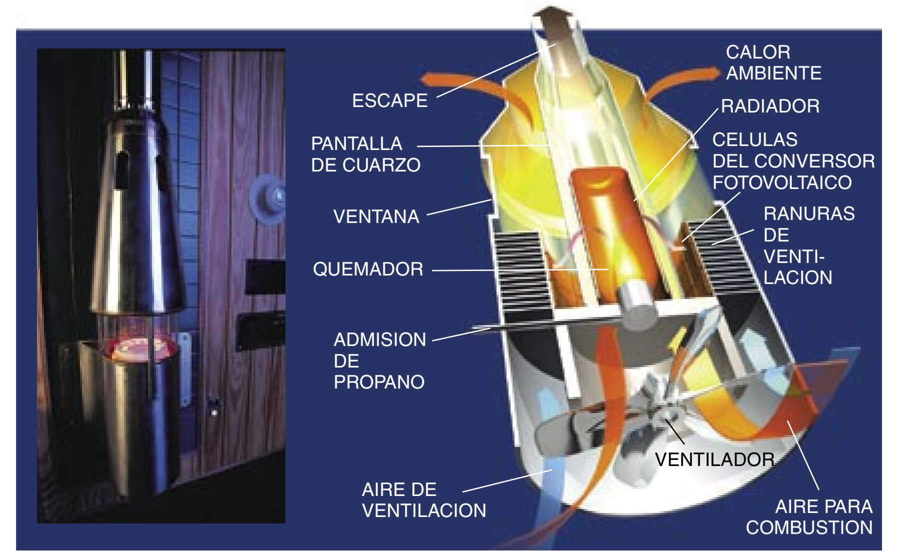
Un sistema termofotovoltaico puede utilizar fuentes de calor tan dispares como el combustible fósil, la radiación solar o una reacción de fisión nuclear. En la práctica, la mayoría de los sistemas en desarrollo emplean combustibles fósiles. Es cierto que, para accionar un generador termofotovoltaico, podría utilizarse la energía solar amplificada hasta intensidades elevadas por medio de "concentradores", pero estos dispositivos, que llenarían una habitación entera, así como los acumuladores de calor para uso nocturno, se encuentran todavía en fase de estudio. Numerosos expertos consideran todavía menos aceptable la otra alternativa, el combustible nuclear, dado el rechazo popular a la radiactividad. La opción nuclear puede, pues, relegarse a aplicaciones especializadas, tales como las sondas espaciales autónomas enviadas al exterior del sistema solar, cuyos paneles solares dejarían de funcionar por falta de luz.

Para construir quemadores que suministren calor se está pensando en aprovechar los recipientes de rejilla metálica o cerámica utilizados en el secado industrial de papel, tintes, pinturas y en la recolección agrícola. Estos quemadores presentan una gran superficie y alcanzan las temperaturas requeridas, por encima de los 1000 grados centígrados.

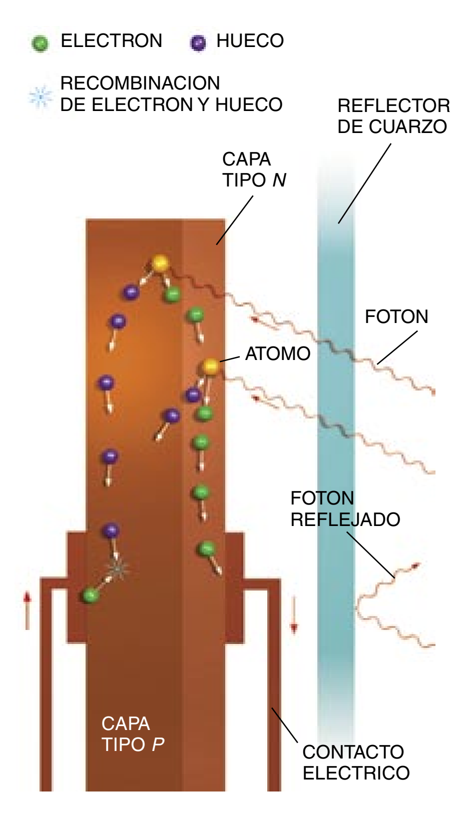
Se necesitan unos radiadores, pues el conversor de semiconductores que transforma en electricidad el calor emitido no puede utilizar con buen rendimiento la energía infrarroja producida por el combustible quemado. El rendimiento satisfactorio sólo se logra dentro de un determinado margen de longitudes de onda, pero la energía infrarroja transmitida por el calor de la llama presenta intensidades y longitudes de onda que varían súbita e inesperadamente (por las corrientes de aire y variaciones de temperatura a que está sujeta la flama). Los radiadores transforman la energía calorífica disponible en una serie de radiaciones con longitudes de onda bien definidas e intensidad uniforme.

Los radiadores pueden tomar la forma de red de minúsculos filamentos o de superficie plana o redondeada. Por materiales se utilizan los óxidos de elementos de tierras raras como el yterbio, erbio y holmio, cuyas propiedades permiten concentrar el calor radiado por el quemador en una banda estrecha de longitudes de onda; el carburo de silicio emite, por contra, un espectro más ancho.

Para los conversores termofotovoltaicos se eligen materiales semiconductores que se acomoden al espectro de longitudes de onda infrarrojas en que emite el radiador. Por así decir, en estas longitudes de onda se concentra la energía necesaria para liberar electrones que de otro modo permanecerían ligados dentro de la estructura cristalina del semiconductor. Los electrones inmóviles de mayor energía residen en la banda de valencia del cristal semiconductor, la cual delimita los niveles energéticos que poseen los electrones situados más al exterior del átomo. Dentro de esta banda de valencia los electrones no pueden vagar por el cristal, pero cuando el átomo absorbe un fotón infrarrojo con la cantidad de energía precisa hay un electrón que realiza el salto a la banda de conducción, y ahí sí que puede circular en forma de corriente eléctrica. (Recuérdese que el fotón es una unidad, o cuanto, de energía electromagnética, que presenta, según las leyes de la mecánica cuántica, propiedades de onda y de partícula; la energía de un fotón determina la longitud de onda que le corresponde.) La energía que necesita un fotón para poder desplazar un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción se denomina energía del intervalo de banda, y se expresa en electronvolts.



2. UN GENERADOR (*fotografía y diagrama*) consta de quemador, que combina el combustible y el aire para producir calor, y radiador de infrarrojos, rodeados ambos por células conversoras termofotovoltaicas con ranuras de refrigeración incorporadas. Al quemarse el combustible, el radiador se calienta hasta 1250 grados por lo menos. La energía en infrarrojos que emite el radiador se transforma en energía eléctrica por medio de 48 células de antimoniuro de galio, conectadas en serie. Al mismo tiempo, parte de la corriente acciona un ventilador, que hace circular aire para refrigerar las células fotovoltaicas. El exceso de potencia eléctrica producida se entrega a una batería para aprovechamiento ulterior. A su temperatura óptima, este circuito produce 30 watts de potencia, utilizando el calor sobrante para calentar la estancia.



3. LA CELULA CONVERSORA transforma calor en electricidad cuando los fotones infrarrojos con la energía adecuada penetran en la célula cerca de la separación entre las dos regiones del cristal semiconductor. Cuando el fotón encuentra allí un átomo, desaloja un electrón y deja un hueco. El electrón emigra a la capa tipo *n* (que tiene más electrones que huecos); los huecos se trasladan a la capa de tipo *p* (en la que hay más huecos que electrones). El electrón va después a un contacto eléctrico de la célula y recorre un circuito externo hasta que reaparece en la capa de tipo *p*, en la que se recombina con un hueco. Si el fotón no alcanza la energía deseada, o intervalo de banda, es reflejado por una pantalla de cuarzo y devuelto al radiador.

Ya en la banda de conducción, los electrones cruzan una unión entre dos regiones diferentes del cristal semiconductor, moviéndose con mayor libertad en un sentido que en el otro. Se acumulan así electrones de carga negativa en uno de los lados de la unión; se crea ahí un potencial eléctrico negativo que fuerza a los electrones a circular en corriente a través de la célula fotovoltaica. El conversor consta de una serie de células interconectadas para aumentar la potencia producida. La corriente generada por el conversor puede luego aplicarse a una lámpara o a cualquier utensilio eléctrico.

Los progresos logrados en materiales han permitido elevar la potencia de salida de los conversores. Cabe ya elegir conversores con valores de intervalo de banda que respondan de manera óptima a la gama de longitudes de onda emitida por un radiador determinado. Antaño, la ausencia de combinaciones radiador-conversor adecuadas había planteado un serio obstáculo al avance de esta técnica.

En la primera generación de dispositivos termofotovoltaicos se utilizaban radiadores que emitían en una estrecha banda de longitudes de onda. A menudo se conjugaban radiadores de óxido de yterbio con conversores de silicio semiconductor con un intervalo de banda de 1,14 eV. En teoría, un radiador selectivo —es decir, que emite en una banda estrecha de longitudes de onda— debe dar mejor rendimiento que los de espectro más amplio (banda ancha). Los fotones emitidos por tal radiador selectivo deben proporcionar la energía mínima necesaria para hacer saltar un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción; toda energía en exceso de esa cota se desperdiciará en calor inútil. Los radiadores selectivos deben, pues, suministrar más energía a un coste menor por watt de electricidad. En la práctica el sistema nunca se ha comportado de acuerdo con lo esperado. El fallo de los radiadores consiste en no emitir una porción suficiente de la energía liberada por el combustible al arder, precisamente en la longitud de onda que necesita un material como el silicio para que el proceso de conversión sea eficaz o se produzca la potencia requerida.

Por otra parte, se requieren temperaturas superiores a los 2000 grados para obtener una intensidad de radiación capaz de producir una potencia que valga la pena. Ese calor puede someter a esfuerzos indebidos el material del radiador y el de los demás componentes, acortando con ello su tiempo de vida. Por último, la combustión a semejantes temperaturas podría provocar emisiones contaminantes de óxido nitroso.

El avance de la técnica termofotovoltaica estriba en haber logrado asociar radiadores que transmiten una gama bastante amplia de longitudes de onda con semiconductores capaces de admitir un espectro tan ancho. Los radiadores de banda ancha como el carburo de silicio pueden dar un buen rendimiento a temperaturas inferiores, por debajo de 1000 grados. Para la industria de la energía solar se han desarrollado materiales semiconductores, procedentes de las columnas tercera y quinta de la tabla periódica —los llamados materiales III-V, como el antimoniuro de galio y el arseniuro de indio y galio—, los cuales realizan la conversión fotovoltaica en

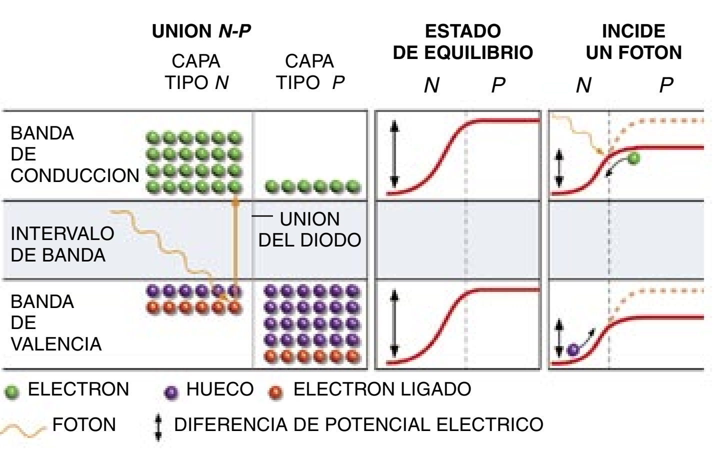
El efecto fotovoltaico

Cuando un material semiconductor absorbe un fotón, se genera en su seno una corriente eléctrica; en este fenómeno se basa la conversión termofotovoltaica. Los electrones de un cristal semiconductor ocupan una gama de niveles de energía definidos, cada uno de los cuales se denomina banda. Cada banda se caracteriza por la cantidad de energía requerida para liberar del cristal un electrón. La banda externa, en la que todavía se impide la libre circulación de los electrones, se llama banda de valencia. Para poder vagar con libertad, los electrones de valencia han de ascender a una banda de energía más elevada (*flecha*), la banda de conducción. Estas dos bandas están separadas por cierto margen de energías que no pueden corresponder a ningún electrón, al cual llamamos intervalo prohibido o intervalo de banda.

En un semiconductor, la banda de conducción está parcialmente ocupada por electrones, que constituyen la carga negativa originada por las impurezas añadidas al material. A su vez, los niveles de energía vacíos de la banda de valencia —huecos o ausencia de electrones— equivalen a cargas eléctricas positivas.

Si el semiconductor tiene más electrones en la banda de conducción que huecos en la banda de valencia, se le llama de tipo *n*, donde *n* significa negativo. Cuando los huecos superan a los electrones, en cambio, el semiconductor es de tipo *p* (positivo).

Al establecer un contacto (unión) entre un material de tipo *n* y otro de tipo *p*, se forma un diodo. Al principio, los electrones de carga negativa tienden a trasladarse hacia los huecos de carga positiva situados en el lado *p* de la unión, mientras que los huecos se dirigen hacia el lado *n*. Se crea una carga negativa en el lado de la unión donde se congregan los electrones, y en el lado opuesto se concentra la carga positiva. Una diferencia de potencial eléctrico, mantenida por una elevada barrera energética, se opone a la circulación continua de corriente (“*estado de equilibrio”, parte central*).



LA ABSORCION de un fotón por el semiconductor provoca el efecto termofotovoltaico

La condición de equilibrio se deshace cuando los protones —partículas fundamentales de la radiación electromagnética— inciden en la unión del semiconductor. Aquellos protones cuya energía es igual o superior a la del intervalo de banda son absorbidos, excitando electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción a través de la banda prohibida. Al alterarse las concentraciones de electrones y huecos, hay electrones que se mueven hacia el lado *n* de la unión y huecos que cruzan al lado *p*. Se reduce así la diferencia de potencial a través de la unión (*derecha del diagrama*) y se produce el fenómeno fotovoltaico: los electrones podrán circular por un circuito externo formando una corriente eléctrica fotogenerada.

Las energías del intervalo de banda requeridas para llevar electrones a la banda de conducción son uno de los factores que distinguen las células termofotovoltaicas de las células solares. En estas últimas, el intervalo de banda varía entre uno y 1,5 eV; en las termofotovoltaicas, suele ser de 0,5 a 0,7 eV: el espectro infrarrojo.

La diferencia en intervalo de banda no implica, sin embargo, que las células solares produzcan necesariamente más potencia. En el caso de una célula solar, los fotones son radiados por el Sol a temperaturas próximas a los 6000 grados centígrados, mientras que los fotones infrarrojos destinados al diodo semiconductor de una célula termofotovoltaica están más fríos, en la gama de 1000 a 1700 grados. La energía óptica que incide en una célula termofotovoltaica es mucho mayor que la que recibe una célula solar, dado que entre esta última y el Sol median 150 millones de kilómetros. Sólo uno o dos centímetros separan la superficie del radiador de la célula termofotovoltaica. De ahí que la potencia obtenida de un conversor termofotovoltaico pueda ser mucho mayor que la producida por las células solares.

—T.J.C. y M.C.F.

las longitudes de onda emitidas por aquellos radiadores. La energía de intervalo de banda requerida para que los materiales III-V generen energía es de 0,5 a 0,7 eV, muy inferior a los 1,14 eV que necesita el silicio.

Ningún sistema termofotovoltaico puede convertir en electricidad toda la energía del espectro infrarrojo. Si la energía de un fotón no alcanza el valor del intervalo de banda del conversor, no podrá desplazar un electrón desde la banda de valencia hasta la de conducción y, por tanto, no generará electricidad. Esos fotones desperdiciados representan un calor inútil, a menos que se encuentre el medio de aprovecharlos. La recuperación de fotones es una parte del sistema termofotovoltaico que se encarga de devolver los fotones de menor energía al radiador, en el cual se reabsorben, ayudando así a mantener caliente el radiador y a economizar combustible. En consecuencia, crecerá la proporción de fotones que alcancen o superen el intervalo de banda.

Se han explorado diversos procedimientos de recuperación de fotones, entre ellos la utilización de una retícula de microscópicas antenas de metal. Estas antenas, que podrían consistir en una fina película metálica colocada sobre la célula del conversor, transmiten a éste los fotones de las longitudes de onda infrarrojas deseadas, y devuelven al radiador por reflexión los fotones restantes.

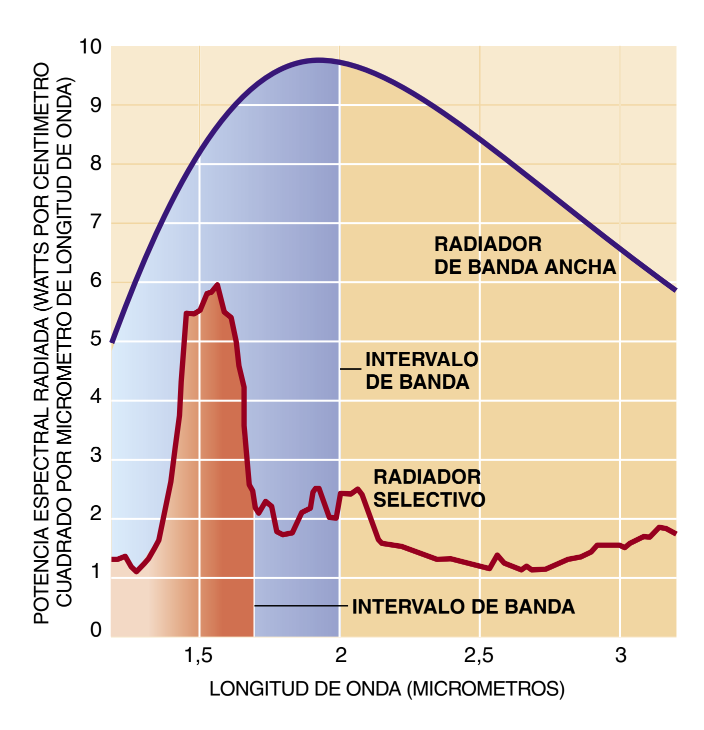
Muchos sistemas de recuperación no han logrado su objetivo: unos detectan una banda de longitudes de onda demasiado estrecha, y otros resultan demasiado costosos. La opción más prometedora parece ser la de reflexión en la cara posterior. Se llama así porque los fotones no absorbidos atraviesan las capas del semiconductor, y luego los devuelve al radiador una capa de oro altamente reflectante fijada en el dorso del conversor.

Se están tanteando diversas estrategias técnicas para el desarrollo y comercialización de productos termofotovoltaicos. Desde 1994 se han celebrado tres conferencias internacionales patrocinadas por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) del Departamento de Energía (DOE) estadounidense. Los resultados obtenidos en modelos de laboratorio despiertan interés. Con radiadores capaces de funcionar a 1500 grados, parece posible obtener densidades de potencia de tres a cuatro watts por centímetro cuadrado de superficie del conversor, utilizando células semiconductoras de una sola unión (lugar en el que se crea un potencial eléctrico).

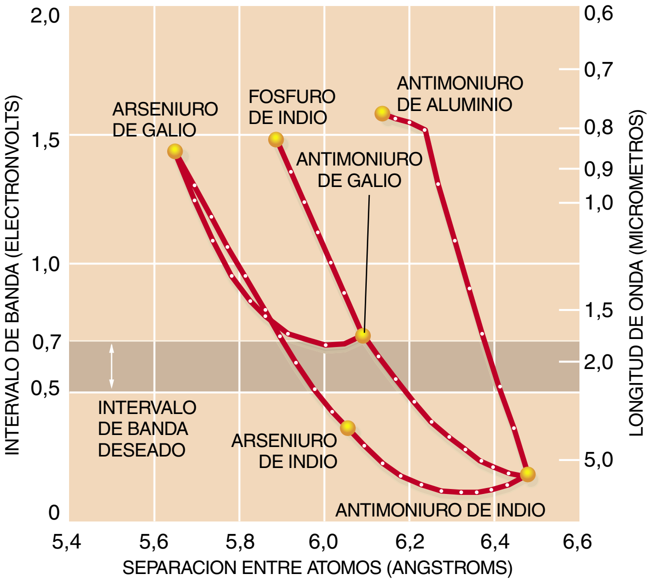
Otra posibilidad en estudio son las células con uniones múltiples, solución inspirada en la industria fotovoltaica solar. Los conversores con células de este tipo pueden captar un espectro de longitudes de onda más amplio, con lo que utilizarán mejor los radiadores de banda ancha. Cada una de las uniones por separado generará corriente tras haber absorbido fotones en bandas de energía distintas entre sí. En teoría, los dispositivos multiunión podrían rendir de cinco a seis watts de energía por centímetro cuadrado. A efectos comparativos, un panel de células solares suele dar unos 15 miliwatts por centímetro cuadrado. Si bien las estimaciones indicadas proceden de modelos de computador, y las potencias reales serán sin duda menores, el caso es que en prototipos se han obtenido densidades de potencia mayores de un watt por centímetro cuadrado.

En varios laboratorios oficiales y privados ha comenzado el proceso de diseño e integración de las partes que componen un sistema termofotovoltaico. Para obtener potencias utilizables se han de interconectar las células del conversor. Siguiendo los métodos tradicionales de fabricación de semiconductores, sobre una superficie única —la oblea— se configuran, graban y conexionan entre sí múltiples células. Se han obtenido así redes de células termofotovoltaicas tanto en el NREL como en la Spire Corporation de Bedford y en el Centro de Investigación Lewis de la NASA. Scott Ward y Mark Wanlass, de NREL, han interconectado en serie pequeñas células termofotovoltaicas, de tal manera que la conexión recorre la cara anterior de una célula y después baja a la cara posterior de la célula adyacente; esta configuración reduce la corriente, aumenta la tensión y reduce al mínimo las pérdidas de potencia.

Según este diseño el conversor terminaría por reducirse a una oblea llena de células con dos contactos externos sólo —los necesarios para crear un circuito—, que podría alimentar una bomba de agua o una cabaña en el



4. LOS RADIADORES DE FOTONES emiten energía en una estrecha banda de longitudes de onda (selectiva), o bien en una banda más amplia (banda ancha), que podrá transformar en electricidad un conversor semiconductor. Los radiadores selectivos, formados por materiales de tierras raras, producen en menor número fotones de energía igual o superior a la del intervalo de banda necesario para la generación de electricidad (*zona roja*). Por el contrario, los radiadores de banda ancha tienen a su favor que llega a la célula una parte mayor de la potencia utilizable (*zona azul*). Los fotones de menor energía —a la derecha del intervalo de banda— se desperdician en calor.



5. LOS CONVERSORES formados por aleaciones de materiales de las columnas tercera y quinta de la tabla periódica alcanzan el valor de intervalo de banda deseado —energía necesaria para liberar un electrón y que circule en corriente—. Los intervalos de banda de 0,5 a 0,7 eV (*zona sombreada*), óptimos para dispositivos termofotovoltaicos, corresponden a longitudes de onda infrarrojas, cada vez más cortas, emitidas por el radiador. Para obtener tales intervalos de banda se combinan el antimoniuro de galio y el antimoniuro de indio en incrementos marcados por los puntos que jalonan la curva roja. El cálculo de la separación entre los átomos (*eje horizontal*) permite unir compuestos con distintas estructuras cristalinas.



6. COCHE EXPERIMENTAL que obtiene parte de su energía de un generador termofotovoltaico.

bosque. Para conseguir la potencia requerida bastará con interconectar muchas obleas. La integración de las células fotovoltaicas puede reducir los costes de esta técnica, toda vez que las células se realizarían siguiendo los métodos normales de fabricación de semiconductores. En el prototipo de Ward y Wanlass se ha ideado un novedoso procedimiento para recuperar los fotones no utilizados. Las zonas eléctricamente activas de la oblea descansan sobre un sustrato semiaislante de fosfuro de indio. Dado que el material no es conductor y que la mayoría de los electrones permanecen ligados con relativa rigidez en el seno del cristal semiconductor, los fotones de baja energía atraviesan el sustrato sin ser absorbidos por los electrones libres que vagan por la banda de conducción. Estos fotones se reflejan luego en una superficie de oro y vuelven al radiador. En prototipos de otros diseños los conversores absorben muchos de los fotones no utilizados.

Mientras prosiguen los trabajos preparatorios, está a punto de salir al mercado el primer producto fototermovoltaico comercial. La empresa JX Crystals de Issaquah ha creado el "Sol de medianoche", destinado principalmente a barcos de vela. Se trata de un calentador cilíndrico de 14 centímetros de anchura por 43 centímetros de altura, que funciona con gas propano y produce 30 watts de energía eléctrica. Servirá para recargar las baterías de los equipos de navegación o de otro género; además, podrá actuar como generador auxiliar para la calefacción ambiental de la cabina. Emplea un radiador parcialmente selectivo de aluminato magnésico y células fotovoltaicas de antimoniuro de galio conectadas en serie.

Aunque su precio actual (unas 450.000 pesetas) sobrepasa al de un generador diesel corriente, el "Sol de medianoche" es muy silencioso; por carecer de piezas móviles se le atribuye una fiabilidad mayor. Este producto puede también atraer a los propietarios de naves de recreo o viviendas en plena naturaleza, pues les costaría mucho menos que el generador termofotovoltaico de metal y acero inoxidable necesario en un ambiente marino.

Pese a sus inconvenientes actuales, todavía se están estudiando los sistemas de radiador selectivo. DARPA ha financiado la división Tecogen de energía térmica en Waltham con el propósito de crear un generador de combustión de gas para alimentación de las comunicaciones tácticas o los ordenadores portátiles en campaña. En el dominio civil, esta misma unidad podría mantener en funcionamiento un horno doméstico cuando falla el suministro. Los módulos de 150 y 300 watts de potencia utilizan redes de fibras de óxido de yterbio en longitud de onda de 980 nanómetros. Estos radiadores selectivos se acoplan con fotoconversores de silicio; la energía no utilizada se recupera mediante un filtro multicapa aislante.

Aunque todavía en pañales —acaba de salir del laboratorio de investigación—, la técnica termofotovoltaica promete grandes logros en numerosos mercados específicos. A largo plazo su participación en el mercado energético mundial podría ser mucho más amplia.

La recuperación de la energía calorífica desperdiciada en la industria podría conquistar un vasto mercado para los productos termofotovoltaicos. En muchos sectores industriales —fabricación de vidrio, aluminio, acero, entre otras—, los procesos de producción generan enormes cantidades de calor. En el sector del vidrio se estima que dos tercios de la energía consumida se pierde en forma de calor, que podría ascender a un gigawatt de potencia. Tal vez los conversores termofotovoltaicos podrían obtener electricidad a partir de ese calor desperdiciado, y con ello la factura eléctrica experimentaría un bajón tremendo. Otra aplicación sugestiva sería el vehículo eléctrico híbrido realizado por la Universidad Occidental de Washington, en el que la potencia de sus baterías se complementa con los 10 kilowatts que suministra un generador termofotovoltaico.

Se está financiando la investigación en dispositivos conversores, radiadores e integración de los diversos componentes en generadores en servicio. En un estudio reciente se le augura a esta técnica un futuro espléndido y a corto plazo. Los productos termofotovoltaicos ofrecen soluciones más limpias, eficaces y económicas para una serie de mercados de energía alternativos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FIRST NREL CONFERENCE ON THERMOPHOTOVOLTAIC GENERATION OF ELECTRICITY. Timothy J. Coutts y John P. Benner en *AIP Conference Proceedings*, vol. 321. AIP Press, 1995.

THE SECOND NREL CONFERENCE ON THERMOPHOTOVOLTAIC GENERATION OF ELECTRICITY. Preparado por John P. Benner, Timothy J. Coutts y David S. Ginley en *AIP Conference Proceedings*, vol. 358. AIP Press, 1996.

THE THIRD NREL CONFERENCE ON THERMOPHOTOVOLTAIC GENERATION OF ELECTRICITY. Preparado por Timothy J. Coutts, Carole S. Allman y John P. Benner en *AIP Conference Proceedings*, vol. 401. AIP Press, 1997.

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Deshilando el tejido de la vida

Si el lector es varón que piense casarse, he aquí un consejo de amigo: optar por una mujer que sea más lista que uno. A esa regla de oro me atuve cuando me casé con Michelle Tetreault, biofísica brillante. Un auténtico volcán de sugerencias, jamás me permite seguir adelante si los pasos andados no está claros.

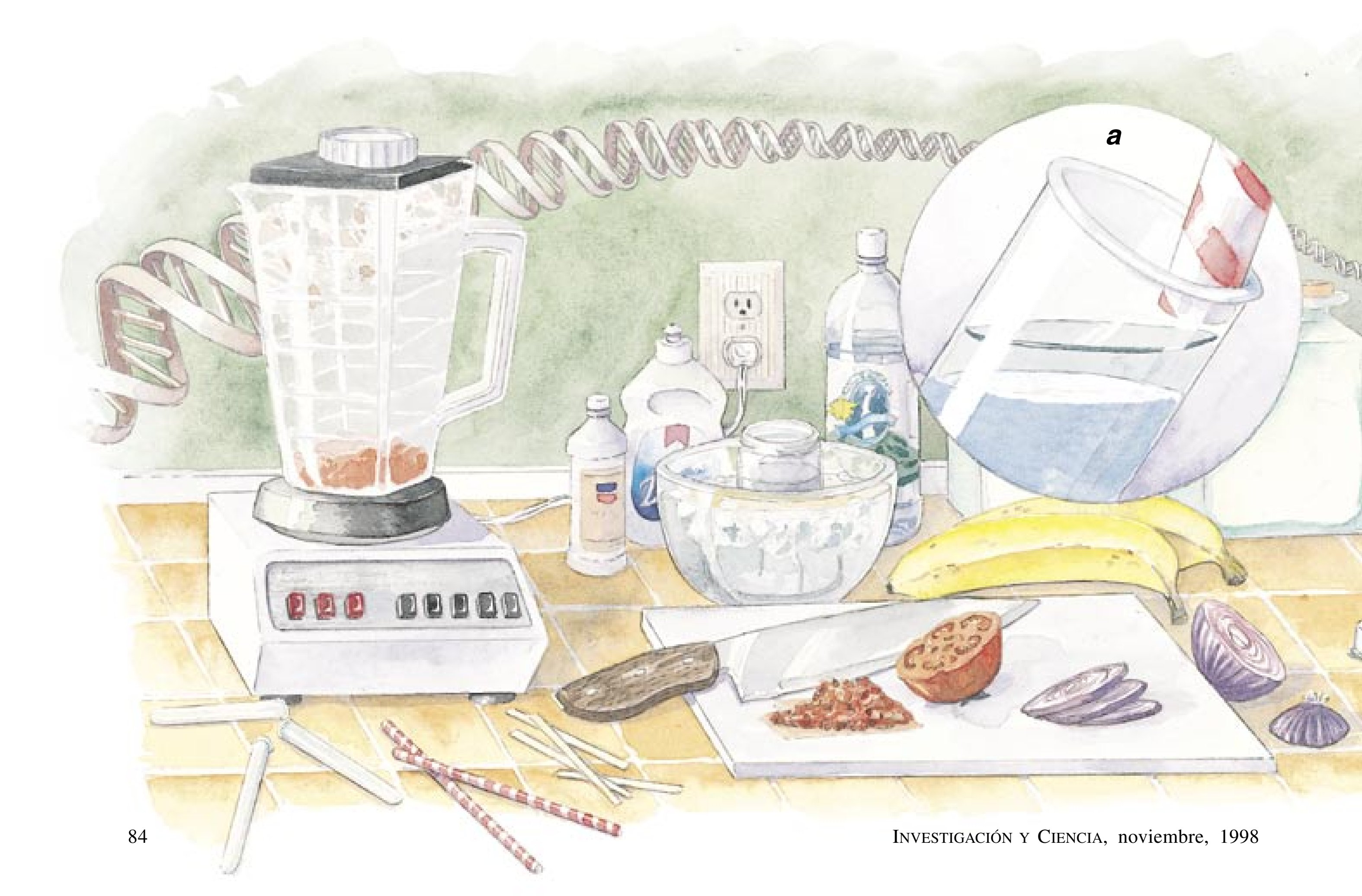
Ella es experta en fotosíntesis y en su labor recurre a las técnicas más modernas de la bioquímica. Manipulando las unidades hereditarias mínimas, los pares de bases de una hebra de ADN, le es posible cambiar uno a uno los aminoácidos que integran una proteína fundamental, para estudiar a continuación hasta qué punto cumple su papel esa molécula alterada.

Me inoculó el gusanillo de la biología molecular. No me cabe duda de que las técnicas punta que ella emplea sobrepasan las posibilidades de cualquier fisgón como yo. Pero la puerta no está cerrada. Empezaremos a entreabrirla este mes remedando algo que para los biotecnólogos es hoy coser y cantar: extraer y purificar ADN.

El ADN es la mayor de las moléculas conocidas. Una hebra entera de ADN consta de millones de átomos. Al separarse de una célula, el ADN se rompe en múltiples fragmentos. En solución, esas hebras poseen una carga eléctrica levemente negativa, hecho que contribuye a crear una química fascinante. Por ejemplo, los iones salinos son atraídos hacia las cargas negativas del ADN, con el efecto de neutralizarlas, y ese fenómeno impide que los fragmentos separados de ADN se adhieran entre sí. Controlando las concentración de sales, los biólogos provocan que los fragmentos de ADN se dispersen o se aglomeren. Y en esto reside el secreto de la remoción del ADN celular.

Se empieza por lisar las células, abriéndolas para verter sus entrañas moleculares en una solución tampón, donde se disuelve el ADN. En ese momento, el tampón contiene ADN y todo un surtido de restos celulares: ARN, proteínas, carbohidratos y otras sustancias en menor cuantía. Fijando las proteínas con detergente y reduciendo la concentración de sales, podemos sacar el ADN, ob-

Un laboratorio de cocina incluye la mayoría de los útiles necesarios para aislar el ADN. Por ejemplo, para añadir alcohol a la solución puede emplearse una paja de sorber refrescos (a)*; un palillo de remover café puede servirnos para desenrollar el ADN* (b)



teniendo una muestra casi prístina de las moléculas portadoras de la herencia.

Mi profundo agradecimiento a Jack Chirikjian y Karen Graf de Edvotek (www.edvotek.com), empresa de biotecnología educativa de West Bethesda (Maryland), por mostrarme la manera en que cualquiera puede purificar el ADN de las células de un vegetal sin salir de la cocina. Lo primero es preparar el tampón. Se vierte 120 mililitros de agua en un recipiente de vidrio limpio, junto con 1,5 gramos ($^{1}/_{4}$ de cucharita de té) de sal de mesa, cinco gramos (una cucharita de té) de bicarbonato de sosa y cinco mililitros (una cucharita de té) de champú o de un detergente de lavandería líquido. Estos productos portan menos aditivos que los jabones de tocador, aunque no hay que renunciar a probar con otros productos.

El detergente cumple una doble misión: lisar las paredes celulares y promover el fraccionamiento de las proteínas largas para que no salgan con el ADN. En Edvotek recomiendan usar sal de mesa pura y agua destilada, pero yo he empleado con éxito sal yodada y agua embotellada, y hasta una vez en que olvidé añadir el bicarbonato obtuve buenos resultados. Evítese el agua del grifo. Para aminorar la velocidad de degradación del ADN, se enfría la solución tampón en un baño de hielo triturado y agua antes de proseguir.



En la despensa está la fuente de ADN. Yo obtuve magníficos resultados con una cebolla; Edvotek recomienda también ajo, plátanos y tomates. Elegida la fruta o verdura, y tras cortarla a cuadraditos e introducirlos en la mezcladora, se añade un poco de agua. Mézclese bien, accionando las hojas de corte de la mezcladora a impulsos de 10 segundos. O bien, más fácil, pásense los trozos por un prensa-ajos. Se romperán algunas células y otras muchas expondrán sus paredes al ataque del detergente.

Introduciremos cinco mililitros de esas gachas de verdura picada en un recipiente limpio; los mezclaremos con 10 mililitros del tampón enfriado. Agítese vigorosamente durante dos minutos al menos. Se procede luego a separar la sustancia vegetal visible del caldo molecular concentrado. Si es posible, empléese una centrífuga. (Para construirlas, léase la sección de marzo.) Centrifúguese el contenido a baja velocidad durante cinco minutos y, después, viértanse cinco mililitros del líquido en exceso en un recipiente estrecho: una pipeta o un frasco de plástico transparente. A falta de centrífuga, cuélese el material por un filtro ordinario de café para eliminar la mayor parte del desecho vegetal. Con suerte, todo desecho que pase el filtrado se hundirá o flotará, por lo que será fácil vaciar los sólidos en el fregadero y luego introducir el líquido aclarado en un recipiente limpio.

La solución retendrá fragmentos de ADN, amén de un enjambre de moléculas indeseables. Para extraer el ADN, enfriaremos un poco de alcohol isopropílico en el congelador hasta los cero grados. En la mayoría de las farmacias se vende en concentraciones del 77 al 99 por ciento. Optaremos por el de mayor concentración (sin colorantes ni perfumes). Con una paja de sorber refrescos, depositaremos 10 mililitros del alcohol enfriado encima de la solución de ADN. Para que no nos entre alcohol en la boca, se coloca la paja en la botella del alcohol y se pellica la superficie con la punta de la paja. Dejaremos que el alcohol se escurra lentamente por la cara interna del recipiente inclinando éste ligeramente. El alcohol, al ser menos denso que el tampón, flotará. Se inserta una varilla estrecha atravesando la capa de alcohol. (Edvotek recomienda un palillo de remover café o una varilla de cóctel de vidrio.)

Con parsimonia removeremos la varilla, hacia adelante y hacia atrás, con su punta justo debajo de la separación entre el alcohol y la solución tampón. Entonces, los trozos mayores de ADN se arrollarán sobre la varilla, quedándose en la solución las moléculas menores. Al cabo de un minuto sacaremos la varilla a través del alcohol, y así el ADN se adherirá al extremo de varilla con el aspecto de un lodo viscoso y transparente agarrado a la punta.

Aunque el resultado sea impresionante, es éste un procedimiento sencillo y barato que no rinde un producto puro. Los profesionales añaden enzimas que fragmentan las moléculas de ARN para asegurarse de que éstas no se entremezclan con el codiciado ADN.

Incluso tras las extracción más concienzuda, es normal que en el recipiente quede ADN residual que forma una telaraña invisible en el líquido. Pero con un pequeño esfuerzo adicional también es posible ver ese material. Algunos colorantes, como el azul de metileno, se adhieren a los fragmentos de ADN dotados de carga. Una minúscula cantidad añadida a la solución remanente revela zarcillos de ADN no recogido. Ignoro si los colorantes de cocina o los tintes de ropa o cabello funcionan también. Sería cuestión de averiguarlo. Añádase sólo una gota; nuestro deseo es que todas las moléculas del tinte se adhieran al ADN, sin que quede ninguna para manchar el agua.

La extracción del ADN de un organismo es sólo el primer paso en la mayoría de los experimentos biológicos. A los aficionados quizá les interese conocer hasta dónde pueden llegar en la experimentación. De momento hasta clasificar los distintos fragmentos de ADN según sus longitudes.

La Society for Amateur Scientists y Edvotek han aunado fuerzas para crear un kit que contiene muestras de células, útiles de laboratorio, enzimas, tampones y detergentes que facilitan la creación de preparados de más calidad. Para más información acerca de éste y otros proyectos científicos para aficionados, visite el foro de la sociedad en http://web2.thesphere.com/SAS/WebX.cgi en la World Wide Web.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

¿Cuántos obreros construyeron las pirámides?

Las pirámides de Egipto se cuentan entre los misterios más enigmáticos de la arqueología. La mayor de todas, la Gran Pirámide de Gizé, construida por el faraón Kéops hacia el año 2500 a. C., continúa prácticamente intacta. Su primitiva altura era de casi 147 metros, y su peso, de unos 7 millones de toneladas métricas. La pirámide está construida con enormes bloques de piedra, que fueron extraídos de la cantera, tallados hasta darles una forma bastante regular, transportados hasta el emplazamiento y apilados después unos sobre otros con suma precisión.

Muchas pirámides sirvieron de tumbas para los faraones; sobre su construcción existe una multitud de teorías. Y ahora los historiadores pueden conjeturar bastante bien el tamaño de la fuerza laboral, merced a cierto trabajo detectivesco de Stuart Kirkland Wier. Sus cálculos fueron presentados en el *Cambridge Archaeological Journal* (abril de 1996).

Unos dos milenios después de terminada la Gran Pirámide, Heródoto afirmaba que para construir la estructura habían sido necesarios 100.000 hombres. Sobrestimó en un orden de magnitud el número de trabajadores. Según Wier, la cifra correcta resulta ser de sólo unos 10.000 obreros. Aunque efectuó sus cálculos para la pirámide de Kéops, el método es aplicable a otras. El primer paso consiste en averiguar cuánta "energía" contiene una pirámide. La energía, en este contexto, significa energía potencial, esto es, el trabajo mecánico necesario para elevar una masa hasta determinada altura. Wier dividió la energía potencial de la pirámide por el número de días invertidos en su construcción. Este cálculo proporcionó la cantidad de trabajo exigido cada día para izar los bloques de piedra. La única fuente de energía de que disponía la fuerza laboral egipcia era la muscular humana. Dividiendo el trabajo requerido entre la capacidad energética de un egipcio, Wier determinó el número de obreros necesarios para llevar a cabo las tareas de elevación de las losas.



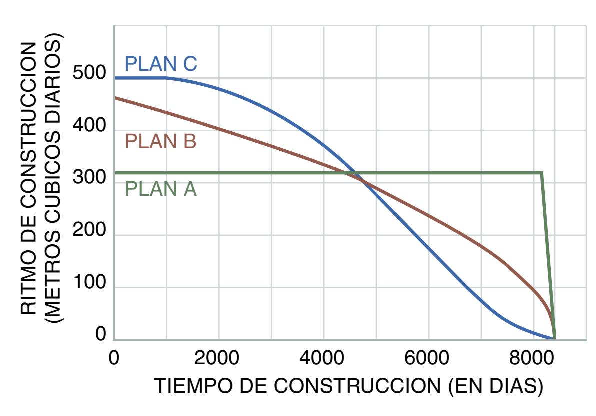
La gran pirámide de Gizé (arriba, en el centro) *pudo haber sido construida con sólo 10.000 obreros* (abajo)

La principal incógnita es el tiempo. ¿Cuánto pudo durar la construcción de la pirámide de Kéops? Este reinó durante 23 años. No es probable que la construcción de su pirámide comenzase antes de la subida al trono. En cambio, pudo quedar terminada ya cercana su muerte o bastantes años antes. Wier supuso que la pirámide de Kéops tardó 23 años en ser construida, lo que equivale a unos 8400 días, dando por supuesto que se trabajase sin interrupción todo el año. El tiempo real pudo muy bien haber sido la mitad; a causa de esta incertidumbre fundamental, sólo es posible una estimación grosera de la mano de obra empleada.

La pirámide de Kéops alcanzaba, recién construida, una altura de 146,7 metros; los lados de su base cuadrada medían 230,4 metros de longitud. El volumen de una pirámide de altura h cuya arista en la base sea s es $s^2 \times h/3$; en el caso de la Gran Pirámide resulta ser 2,6 millones de metros cúbicos. Edificada con piedra caliza de una densidad de 2700 kilogramos por metro cúbico, su masa es de unos 7 millardos de kilogramos. La energía potencial de una pirámide es $h^2 \times d \times s^2 \times g/12$, donde g designa la aceleración de la gravedad (9,81 metros por segundo en cada segundo). Evaluada para la Gran Pirámide, esta energía se cifra en 2,52 billones de joules.

FUERZA LABORAL NECESARIA PARA CONSTRUIR LA PIRAMIDE

ALTURA DE LA PIRAMIDE (METROS)	ARRASTRE Y ELEVACION DE BLOQUES	CANTERIA Y OTRAS TAREAS	FUERZA LABORAL TOTAL
140	450	171	621
120	2820	1180	4000
100	4440	2060	6500
80	5640	2950	8590
60	6440	3860	10.300
40	6810	4690	11.500
20	6770	5630	12.400
0	6310	6490	12.800



Tres hipotéticos planes de trabajo que permiten construir la pirámide en 8400 días

Por término medio, un hombre puede proporcionar diariamente un trabajo útil de unos 240.000 joules. Suponiendo una eficiencia energética perfecta, para izar y colocar en su lugar los bloques pétreos serían necesarios 1250 hombres trabajando sin cesar durante 8400 días; una estimación demasiado baja. Wier la multiplicó por un coeficiente de pérdidas de 1,5, para tener en cuenta las ineficiencias en la aplicación de la potencia muscular. También tuvo en cuenta la cantidad de trabajo exigida para elevar las piedras desde el fondo de la cantera de Kéops hasta el nivel del emplazamiento de la pirámide, diferencia que se sabe era de 19 metros.

Las pirámides no son meros montones informes de piedras: hay cámaras y pasadizos, algunos de los cuales son, por sus propios méritos, notables proezas de ingeniería. Pero la mayor parte de la construcción consistió en ir apilando bloques, por lo que podemos despreciar los detalles estructurales. Las pirámides se levantaron capa a capa, de abajo arriba. Como es obvio, no era posible colocar nuevos bloques en la estructura hasta que los bloques situados por debajo hubieran quedado en su lugar. No se sabe cómo se izaban los bloques. Algunos opinan que los arrastraron sobre inmensas rampas de arena. Otros piensan que debieron utilizarse ingeniosos sistemas de palancas.

Los obreros transportaban los bloques de piedra desde la cantera hasta el lugar de construcción arrastrándolos sobre trineos de madera. (Así lo atestiguan representaciones en bajorelieve.) La cantera para la pirámide de Kéops se encontraba a varios cientos de metros de su base. Para calcular el número de hombres necesarios para el arrastre, Wier estimó el rozamiento entre un trineo de madera cargado y el suelo; determinó después el trabajo necesario para vencer la fricción. También se requería mano de obra para otras tareas: arrancar de la cantera los bloques de piedra, tallarlos, conformarlos e instalarlos en la pirámide. Wier supuso que todas esas tareas exigían un máximo de 14 hombres por metro cúbico de piedra y día.

Los cálculos anteriores dan el número medio de trabajadores de Gizé. Ahora bien, ¿emplearon los arquitectos una fuerza laboral de tamaño fijo, o, por el contrario, reclutaban nuevos obreros cuando la tarea lo exigía y los despedían cuando ya no eran necesarios? Aunque los registros no lo dicen, cabe inferir varias posibilidades.

Al dividir el volumen de la Gran Pirámide entre el tiempo disponible para construirla resulta que ha de colocarse diariamente un volumen de 310 metros cúbicos de piedra. Sin embargo, al crecer la pirámide hay que elevar cada vez más los bloques de piedra, lo cual, a su vez, exige mayor trabajo. Y el espacio disponible para los encargados de la tarea —el área en lo alto de la pirámide truncada— va decreciendo también conforme sube la pirámide. De lo que se desprende que no es razonable suponer un ritmo constante de 310 metros cúbicos diarios. El ritmo de construcción, célere cuando la pirámide tenía poca altura, se enlenteció con la altura.

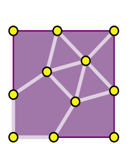
Wier examinó tres posibles planes de construcción. Según el plan A, los obreros van instalando los bloques al ritmo constante de 315 metros cúbicos diarios al día, hasta el día 8110. En ese punto, el ritmo de construcción desciende bruscamente a causa del reducido espacio de la cima. En el plan B, la tasa de construcción comienza siendo de 462 metros cúbicos al día y va disminuyendo regularmente hasta el día 8000, a partir del cual cae más deprisa. Según el plan C, la velocidad de construcción comienza siendo de 500 metros cúbicos al día, pero desciende rápidamente a partir del día 2000, tendiendo hacia cero después del día 7000. Aunque los tres planes terminan la pirámide en 8400 días, el número de obreros requeridos varía mucho conforme progresa la obra.

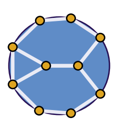
En la pirámide esquemática que adjuntamos, se indica el número de obreros necesarios en cada fase de la construcción si se sigue el plan B. Al principio, alrededor de la mitad de los obreros se ocupan en arrastrar o elevar las piedras, y la otra mitad se dedica a la extracción de la piedra, instalar los bloques y a diversas otras tareas. Hacia el final, sin embargo, casi las tres cuartas partes de los obreros se dedican al movimiento de las piedras. No se pasa en ningún momento de unos 12.800 hombres, alrededor del 1 por ciento de la población estimada de Egipto en la época. Los planes A y C conducen a resultados similares.

Tal vez el plan más sencillo consistiera en emplear una fuerza laboral de tamaño constante, excepto hacia el final, cuando en lo alto sólo queda sitio para unos pocos obreros. Con este plan, bastarían 10.600 hombres para construir la Gran Pirámide de Kéops. Todavía sería menor el número de los necesarios para erigir las otras grandes pirámides de Gizé y Dahshûr.

Acuse de recibo

En "Enlatado de sardinas redondas" [abril], donde me ocupaba del empaquetamiento de círculos, escribí que "casi toda la información acerca de esas cuestiones se remonta como mucho a 1960". Un lector interpretó erróneamente este comentario, como si hubiera despreciado los trabajos de Gauss, Lagrange y otros. Al escribir "tales cuestiones" me refería al empaquetamiento de objetos en regiones finitas, como 11 círculos en un cuadrado (*arriba*) o 10 círculos dentro de otro mayor (*izquierda*). (Los círculos están representados por puntos que señalan sus centros.) El trabajo clásico se ocupa de empaquetamientos en el plano infinito y supone, además, que los objetos se ordenan en una disposición regular. En los problemas examinados en el artículo la región es de extensión finita y la disposición de los círculos no tiene por qué ser regular. —*I. S.*





NEXOS

James Burke

Asuntos rebeldes

El otro día, en un viejo café de Londres, mientras saboreaba una taza, de *Folger* por supuesto, el aroma me llevó en volandas a sus orígenes. Una escena no muy distinta de la que se desarrollaba en la explanada de la catedral de San Pablo, donde acudían, en los años sesenta del siglo XVIII, los partidarios de los colonos americanos. Liberal y empedernido bebedor de café fue, entre ellos, Richard Price, matemático que sentó las bases modernas del estudio de riesgos aplicado a los seguros, gracias a sus análisis del registro de defunciones de Northampton. A partir de los cálculos realizados, pudo deducir asuntos de vida y muerte de manera que las nuevas compañías de seguros pudieran fijar cuotas realistas y no desaparecieran antes que sus clientes.

El trabajo estadístico de Price atrajo la atención del ministro francés de hacienda, Anne-Robert-Jacques Turgot, que tenía la nada envidiable tarea de cuadrar los libros de cuentas en un tiempo en que la economía francesa se iba al garete. Era cofrade y consejero de Turgot el Marqués de Condorcet, que se hizo famoso porque llevó la estadística a un nivel superior e inventó lo que llamó "matemáticas sociales". Con ellas, intentó predecir todos los aspectos del comportamiento y dotar de fundamento científico al estudio de la sociedad.

Turgot y Condorcet pertenecían a la escuela fisiócrata del pensamiento económico, que contemplaba el ejemplo del mercado inglés, agrícola y ligeramente regulado, como el único que podía salvar a Francia de la ruina. Para ellos, el precio del pan era la clave de la estabilidad política. Pero no pudieron salir de la panadería a tiempo de salvar la cabeza. Camino de la muerte en una prisión revolucionaria, Condorcet se aprestaba a explicar las ideas agrícolas del abogado inglés Jethro Tull. En 1711, Tull visitó el sur de Francia por motivos de salud y observó cómo los campesinos que cultivaban los viñedos en los alrededores de Frontignan cavaban con azada los surcos. De esta forma (aunque él lo ignorara) aireaban la tierra y la hacían más permeable al agua. Conseguían así grandes cosechas sin el caro recurso al estiércol de vaca. Cuando Tull comprobó en suelo virgen que, gracias a este truco, el mismo terreno podía producir cosechas durante trece años sin abonar, adquirió predicamento en el vecindario. (El libro en que desveló el secreto, *La nueva agricultura con caballo y azada*, tuvo un éxito inmediato.)



La segunda versión de esta obra, que produjo un verdadero movimiento de tierras, la editó un periodista de punzante fama que se le conocía por Peter Puercoespín. De nombre William Cobett, inició su carrera con la pluma mientras enseñaba inglés a inmigrantes franceses de Filadelfia. Con palmaria desconexión de la realidad, escribió diatribas contra las incipientes ideas americanas sobre la democracia. En 1794, llegó a América el eminente científico inglés Joseph Priestley, que huía de soliviantadas masas antiamericanas, como la chusma que había destruido su laboratorio. El legalista Cobett le recibió con un artículo en que escarnecía el liberalismo de Priestley y los científicos ingleses proamericanos.

El propio Priestley había iniciado su andadura como ministro de la iglesia y había dirigido una escuela dominical. Uno de sus colaboradores era Roland Hill, cuyo renombre le viene de su reforma del servicio postal inglés; introdujo los primeros sellos de goma para el pago previo de los envíos: el *Penny Black*. La carrera docente de Hill despegó cuando se le encargó la dirección de la Escuela Hazelwood de Birmingham, innovadora donde las hubiere. Disponía de luz de gas y calefacción central, así como de piscina; en ella se enseñaban matemáticas aplicadas y lenguas modernas. En 1822 Hill y su hermano publicaron un modesto trabajo titulado *Educación pública* que llamó la atención de simpatizantes de la izquierda, como el molinero ilustrado Robert Owen, fundador de lo que acabaría por convertirse en el partido socialista británico.

Owen emigró a América para establecer una comunidad utópica, fenómeno de moda, en New Harmony, Indiana. Cuando la comuna fracasó,

Owen volvió a Europa, pero sus hijos se quedaron y adquirieron la ciudadanía americana. Uno de ellos, Robert Dale Owen, medró en la vida pública de Indiana. En 1888, su hija Rosamond se casó con el ferviente sionista y espiritualista Laurence Oliphant. Una semana después su desconsiderado marido falleció.

Tiempo atrás, Oliphant había sido corresponsal del *Times* londinense en la Guerra de Crimea. Tuvo tiempo de trabajar como espía británico. Fue también secretario de Lord Elgin, gobernador general de Canadá pero que es más conocido como hijo del hombre que en 1803 distrajo los mármoles Elgin. O, como diría Elgin padre, los "resituó por su propio bien". Los mármoles, en la actualidad en el Museo Británico, eran, en su mayoría, enormes fragmentos del friso de la Acrópolis, del siglo V a.C. Cuando Elgin, pertenecían a las tropas turcas de ocupación, que no podían haber descuidado más el edificio.

Se tardó trece años en llevar los mármoles a Inglaterra, para luego venderlos a precio de saldo al gobierno británico y arruinar a la familia por dos generaciones. Pero Elgin, sin un penique, no se encontraba en la mejor situación para regatear. Sir Thomas Lawrence, pintor del rey y gran artista, fue uno de los promotores de la adquisición. Fue un niño prodigio. En 1816 cobraba al Duque de Wellington y al príncipe regente un riñón por acceder a sus caprichos. Pero ya era famoso en 1792, cuando se le nombró miembro de la Regia Sociedad. El ingreso en círculo tan selecto requería (a) ser aristócrata y (b) haber cruzado los Alpes en pos de cultura. Lawrence no era lo uno ni había hecho lo otro, pero sí era amigo de Sir Joseph Banks.

Banks, íntimo del Rey, presidía entonces la Regia Sociedad, así que las reglas de la institución se acomodaron a Lawrence (no sé si me explico...). Banks tenía lo que consideraban unos antecedentes científicos impecables, esto es, había nacido rico con lazos familiares óptimos y pasión por la botánica. Por ello, años antes, en 1768, no le había costado hacerse con la codiciada plaza de naturalista en el primer viaje del capitán James Cook de exploración del Pacífico. Las varias escalas del viaje inspiraron a Banks la promoción de Australia como cercado idóneo donde confinar criminales convictos, así como la organización de otro tipo de trasplantes: el del árbol del pan de Tahití a las Indias Occidentales.

El primer barco enviado para realizar esta misión alimentaria fue el HMS *Bounty*, cuyo mera mención suena a motín. Los amotinados dejaron a la deriva al capitán Bligh en un bote y navegaron mar adentro. Nada se supo de ellos, hasta que se descubrió a sus descendientes, treinta años después, en la isla de Pitcairn. Ellos mantuvieron que su líder, Fletcher Christian, primer oficial de a bordo, había vuelto en secreto a Inglaterra y a una vida en el anonimato gracias a un barco americano y a su capitán. Era el capitán Folger, tío abuelo del hombre que fundó la compañía que hizo el café que disfrutaba al inicio de la columna.

LIBROS

Extremófilos

¿Quiénes?

LIFE ON THE EDGE, por Michael Gross. Plenum Trade; Nueva York, 1998.

A medida que, más que agotarse, se trivializan los temas de siempre o de antaño, otros aspectos de la vida demandan la atención del estudiante y aun ejercen su poder de atracción sobre la del aficionado ilustrado. Poder de atracción cierto tienen las "maravillas de adaptación" que manifiestan seres vivos muy diminutos y que se han calificado de "extremófilos", por parecer extrañamente adaptados a condiciones que los humanos calificamos de "extremas", o sea, muy por fuera de lo que creemos que vale para una existencia "normal". Aquellos seres sólo prosperan bajo condiciones límite de temperatura, presión, ausencia de oxígeno, etcétera, muy diferentes de las que operan en nuestro entorno humano y a su escala. En buena lógica, somos nosotros los extremófilos, pues aquellos organismos no sólo son más antiguos y se hallan más cerca del origen de la vida, sino que persisten aferrados a su entorno peculiar de características arcaicas, que no les falta.

Su estudio amplía notablemente nuestra visión de la naturaleza. Desde el punto de vista de la genética, complementan por "abajo" la escala de la vida, tal como se expresa en los organismos más conocidos y más directamente emparentados con nosotros, por lo menos bioquímicamente. Los organismos que se originaron y viven bajo condiciones impensables para nosotros, nos hacen más fácil entender la vida como fenómeno cósmico, lo cual es en sí más interesante que admitir la posible existencia de vida en otros astros o imaginarla con fantasía, o, para decirlo todo, como en el reciente chasco de los microbios marcianos.

Esta es la visión que ilustra, con el detalle necesario, el presente libro, en el que un científico joven presenta, de primera mano, una descripción actualizada, centrada principalmente en el estudio de organismos muy simples, que, además de bacterias genuinas, incluyen otras formas bacteroides peculiares que se consideran como aún más primitivas (las Archaea). Es un mundo que puebla ambientes de condiciones extremadas en nuestro planeta: temperaturas altas, carencia de oxígeno, elevadas presiones, incluso en el interior de las rocas, en el petróleo, en las aguas del mar Muerto y un poco en todas partes. Semejantes organismos pudieron ser dominantes al principio de la vida en la Tierra, cuando el planeta ofrecía condiciones muy diferentes de las presentes.

La vida es realmente química, bioquímica. El estudio de las fronteras y la operación general de las leyes físicas ayuda a entender la adquisición y persistencia de organización. De manera llana, el libro introduce eficaz y sencillamente temas de interés general en biología: la composición química y las regularidades de la bioquímica. Los aspectos químico y estructural de la vida han evolucionado paralelamente, modificando, a su vez, las características de la periferia del planeta, que permitieron nuevas etapas de la evolución hasta llegar, por lo menos, a nuestra especie. En este sentido, algunas especulaciones introducidas en las páginas de este libro encajan con la hipótesis de Lovelock, divulgada bajo el nombre de Gaia, que supone que las condiciones actuales de la vida sobre la Tierra son, en buena parte, resultado de la actividad, extendida por considerable tiempo, por parte de organismos muy primitivos. Y algunos de ellos subsistirían en ambientes antes comunes, pero que ahora se nos antojan como raros.

Este libro es un buen ejemplo del ritmo vivacísimo al que progresan la biofísica y la bioquímica y puede ser útil para actualizar los conocimientos propios y descartar la ganga inútil que se propaga por simple costumbre. Antes la ameba recibía los honores de organismo primitivo, después las bacterias, ahora las "arqueas": el cambio de panorama ha sido gradual, pero bien instructivo. El interés y la pericia del autor se muestran básicamente en el área de la bioquímica y nos introduce en las complicaciones de los mecanismos auxiliares de la regulación.

La presente versión en inglés de este libro ha aparecido poco después de su edición original en alemán. La estructura, las funciones y la transmisión hereditaria en los organismos más simples, como fundamentos de lo que llamamos vida, se nos revelan como admirables y complicadas.

RAMÓN MARGALEF

De la neurona

Al concepto

THE GOLGI APPARATUS. Dirigido por E. G. Berger y J. Roth. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1997. **THE HISTORY OF NEUROSCIENCE IN AUTOBIOGRAPHY**. Dirigido por Larry R. Squire. Society for Neuroscience; Washington, 1996.

DEVELOPMENT AND FLEXIBILITY. Edición preparada por Terry Whatson y Vicky Stirling. Springer Verlag-The Open University; Londres, 1998. **THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM OF VERTEBRATES**, por R. Nieuwenhuys, H. J. ten Donkelaar y C. Nicholson. Springer; Berlín, 1998.

TOWARD A SCIENCE OF CONSCIUOSNESS. THE FIRST TUCSON DISCUSSIONS AND DEBATES. Dirigido por Stuart R. Hameroff, Alfred W. Kaszniak y Alwyn C. Scott. The MIT Press; Cambridge, 1996. **THE LARGE, THE SMALL AND THE HUMAN MIND**, por Roger Penrose y la participación de Abner Shimony, Nancy Cartwright y Stephen Hawking. Cambridge University Press; Cambridge, 1997. **EPISTEMOLOGY**, por Robert Audi. Routledge; Nueva York, 1998.

Se cumple el centenario del descubrimiento por Camillo Golgi del "apparato reticolare interno", el orgánulo celular que hoy lleva su nombre. No tendría mayor trascendencia que el de un hallazgo citológico más, si no fuera porque con ocasión del mismo llegó la quiebra de la neurología vigente. Lo que no obsta para que esa estructura perinuclear, de funciones secretoras y principal

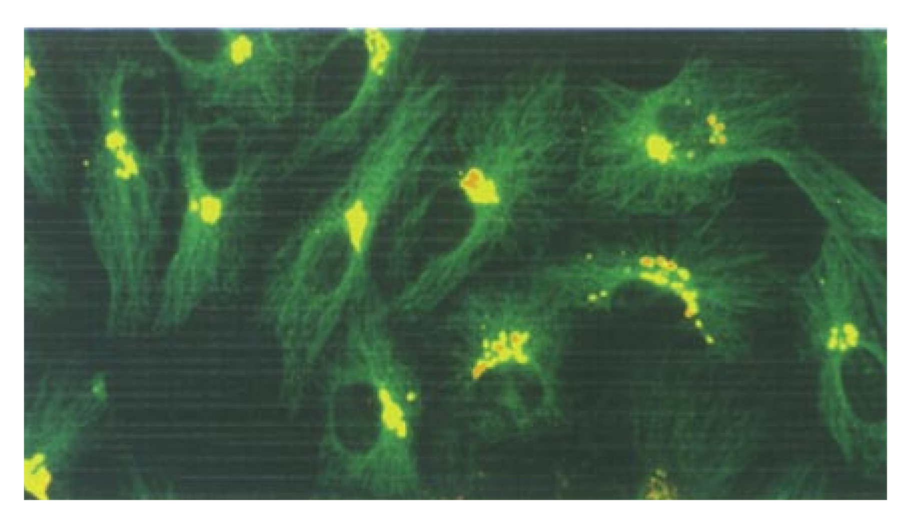
estación de distribución de proteínas, haya seguido su propia aventura, según se pormenoriza en *The Golgi Apparatus*.

Sirviéndose de un método de impregnación argéntica ("reazione nera"), Golgi describió el aparato reticular en células de Purkinje. Cajal generalizó la presencia del orgánulo a otros tipos celulares, con exclusión del hepatocito. (Salvedad injustificada, pues el hepatocito no constituye excepción alguna.) Hasta los años cincuenta, sin embargo, permaneció en entredicho la existencia del aparato de Golgi. Para los más se trataba de un artefacto de la observación; los partidarios, convencidos de su realidad, ubicuidad y asociación con los procesos de secreción, replicaban que la única dificultad estribaba en la preparación de las muestras.

El manejo hábil del microscopio electrónico disolvió la controversia. Aparece allí el aparato de Golgi cercano o yuxtapuesto al núcleo celular a modo de cinta donde se distinguen regiones compactas de sáculos apilados que se alternan con zonas tubulares. Se precisó su anatomía con la introducción en los sesenta de la técnica de criofraccionamiento. Y en 1979 Rambourg consolidaba, mediante métodos estereoscópicos, su carácter unitario en la continuidad de túbulos laterales entre cisternas.

Golgi aplicó con éxito su técnica a la representación de ramificaciones neuronales en el sistema nervioso central y en las tramas perineuronales. El Nobel, que compartió con Cajal, premiaba el primer logro. Creía que el sistema nervioso formaba una red continua ("rete nervosa diffusa"), tesis negada por nuestro compatriota. Apoyado éste en el método de Golgi, estableció la doctrina de la neurona y, con ella, puso los fundamentos de la neurociencia moderna. Cajal sostenía que las neuronas eran entidades limitadas por membrana, separadas unas de otras por un intersticio intercelular. Además, cada neurona se hallaba funcionalmente polarizada.

El desarrollo subsiguiente aparece escrito en *The History of Neuroscience in Autobiography*. No fue ajeno a su esplendor la aportación de otro español eminente, Rafael Lorente. Lo destaca Benjamin Libet y, sobre todo, Denise Albe-Fessard: "para darle un fuerte impulso a la actividad de nuestro grupo, el CNRS organizó un coloquio en el Instituto Marey en 1949, congregando a los grandes nombres de la neurofisiología del momento, en particular Alan L. Hodgkin y Rafael Lorente de Nó".



El aparato de Golgi (naranja) *es un orgánulo singular, perfectamente delineado en torno al núcleo. En verde, los microtúbulos*

Las diecisiete memorias que abarca este volumen primero cubren el espectro completo de la cimentación de las neurociencias. Con Julius Axelrod asistimos a la explicación del almacenamiento, liberación e inactivación de las catecolaminas neurotransmisoras. Debemos a Viktor Hamburger el trazado de las líneas maestras por donde habría de discurrir la neurobiología experimental. Maestro y discípulo, Seymour S. Kety y Louis Sokoloff. El primero trabajó en el riego sanguíneo y consumo de oxígeno del cerebro humano. Sokoloff pergeñó la técnica de la 2-desoxiglucosa para medir cuantitativamente el metabolismo regional del cerebro. Y así el resto. Una y otra vez se repiten reglas y consejos cajalianos. Apunta, por ejemplo, Bernard Katz, quien estableció la naturaleza mensurable de la liberación de neurotransmisores y describió el mecanismo de la sinapsis, que él nace a la neurofisiología en los días en que las leyes de la excitación eléctrica del nervio y su precisa formulación matemática se consideraban todo un hito, sin más equipo de laboratorio que unos cables, resistencias, condensadores y una preparación neuromuscular de rana.

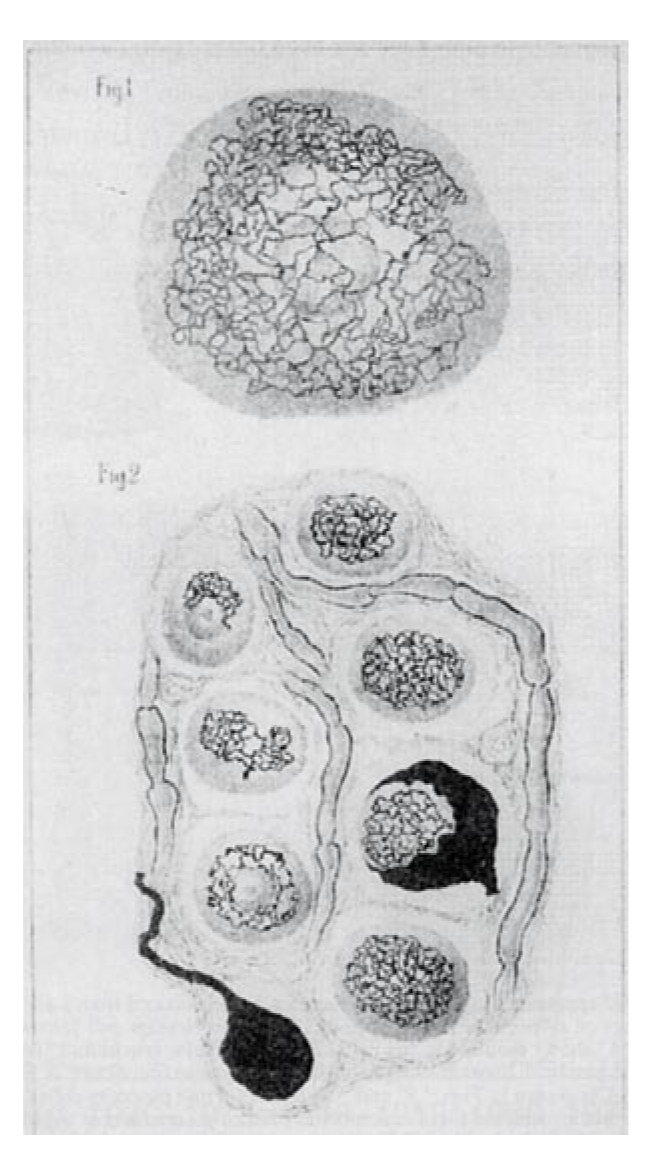
No son capítulos cerrados. Desde hace 30 años, la neurología busca el motivo de la organización columnar del córtex. Las columnas de células se forman tras el nacimiento. El fenómeno, demostrado en 1957 por V. B. Mountcastle en la corteza somatosensorial, fue investigado por David Hubel y T. Wiesel en la corteza visual. Hallaron éstos que las células de una columna, que se extendían desde la superficie de la corteza hasta la materia blanca subyacente, poseían rasgos similares. Dos propiedades aparecían organizadas en columna, a saber, la dominancia ocular (respuesta a los ojos derecho, izquierdo o ambos) y la selectividad de orientación (respecto a la situación de una barra: horizontal, vertical o en ángulo). Cuando se investigó la corteza visual de los macacos se evidenció una tercera propiedad: el color. Confiesa aquí Hubel que la idea de que las columnas de orientación alojaban juntos agregados de células que la fisiología ponía en relación, constituyó una de las tesis más bellas y luminosas de su vida.

Para formarnos una opinión cabal del estado hoy de la neurología, con su cohorte de subdisciplinas, podemos fiarnos de dos obras maestras. Desde una óptica evolutiva y comparada, sobresale el triple volumen *The Central Nervous System of Vertebrates*; con mirada preferente a nuestra especie, *Development and Flexibility*. En el primer caso, de autoría múltiple, se cumple un triple propósito: establecer los fundamentos de la neuroanatomía comparada, presentar una revisión comprehensiva de la organización estructural del cerebro y espina dorsal de los vertebrados y abrir surcos para la investigación ulterior.

La neurona, unidad fundamental del sistema nervioso, difiere de otras células del organismo. Consta de una superficie receptora, dendritas, soma celular y axón con sus ramificaciones terminales. El soma o cuerpo celular es una abultamiento, de cinco a diez micrometros de diámetro, cuyo núcleo encierra la especificación genética de la célula y cuyo citoplasma aloja la

sustancia de Nissl. Dejando aparte otros orgánulos de los que se ocupa *in extenso* la citología, recordaremos que el citoesqueleto se compone de tres elementos, cada uno de los cuales es un polímero: microtúbulos, neurofilamentos y microfilamentos. El citoesqueleto se halla sujeto a modificación constante, es el determinante estructural de la neurona y vehicula el transporte intracelular.

Las dendritas comprenden una vasta expansión protoplasmática, encerrada por lo común en una membrana que forma la superficie receptora primaria para los contactos con otras neuronas. Presentan unas estrangulaciones o espinas. La concentración de espinas varía con su posición en el árbol. El axón emerge del soma celular y recorre una distancia considerable. Suele terminar en el telodendron, que acaba en los botones sinápticos, donde observamos vesículas que contienen substancias transmisoras. Hay en los axones microtúbulos, neurofilamentos, retículo endoplasmático rugoso y cuerpos multivesiculares. Envuelve a los axones una vaina de mielina, interrumpida por nódulos de Ranvier. No se ha hallado mielina, cuya función estriba en aislar las fibras nerviosas y permitir la transmisión eficaz de los impulsos eléctricos, ni en el sistema nervioso de los invertebrados ni en el de los vertebrados agnatos.



Dibujos originales de Golgi del "apparato reticolare interno"

La transmisión sináptica es uno de los rasgos distintivos del sistema nervioso. Acontece en puntos especiales, con una hendidura estrecha que separa los componentes presinápticos de los postsinápticos. El componente presináptico suele ser un terminal axónico; el elemento postsinático, una dendrita o una espina. La sinapsis mejor estudiada es la unión neuromuscular, que pone en conexión el axón de una motoneurona con el músculo. Aunque aquí la acetilcolina es la molécula transmisora, sépase que el glutamato constituye el transmisor más ubicuo del sistema nervioso central de los vertebrados.

Importa, asimismo, tomar en consideración las células de la glía que, a diferencia de las neuronas, no producen potenciales de acción y carecen de sinapsis. E importa, en no menor medida, el microentorno celular. La neurona depende del medio circundante para su supervivencia y posiblemente para la expresión de algunas de sus funciones. El entorno mantiene una concentración apropiada de sustratos metabólicos e iónicos esenciales.

Si inspeccionamos cortes recientes de cerebro o médula de mamíferos, unas regiones nos parecen blanquecinas y otras tienden al gris. Esta división entre *substantia alba* y *substantia grisea* se observa mucho mejor en la médula y en el telencéfalo. En la médula, la materia gris se halla centralmente localizada y tiene una apariencia en H típica, rodeada por un manto de materia blanca. En el telencéfalo esa relación se muestra invertida. La materia gris consta de árboles dendríticos, segmentos axónicos iniciales de las neuronas, así como segmentos terminales y extremidades sinápticas de los axones. La materia blanca está compuesta por fibras nerviosas con y sin mielina. En los anamniotas y reptiles la materia blanca contiene, además de fibras nerviosas, redes extensas de arborizaciones dendríticas y ramificaciones axónicas. En los acraniatos y ciclóstomos, los axones carecen de mielina; por tanto, estrictamente hablando en estos grupos no hay materia blanca.

¿Cómo procede la neuroanatomía comparada? Por definición estudia la forma, estructura y ultraestructura del sistema nervioso. Este tubo transformado cuyas unidades acabamos de describir presenta en los vertebrados simetría bilateral y polarización rostrocaudal; es, además, topológicamente equivalente. En un primer momento, la neuroanatomía comparada pretendía reconstruir la filogénesis cerebral mediante el cotejo de especies aleatoriamente escogidas de un pez, un anfibio, un ave, etcétera. Pero las conclusiones extraídas del análisis de tales series carecían de valor por la sencilla razón de que los vertebrados no han seguido una evolución lineal. En la filogenia de los vertebrados se han producido cuatro grandes radiaciones (Agnatos, Condrictios, Osteictios y Tetrápodos). Cada una de estas radiaciones ha dado origen a nuevos grupos distintos. Ningún grupo vertebrado actual es antepasado de otro. Lo que no impide que, en principio, pueda reconstruirse la filogenia del sistema nervioso central de los vertebrados y producir morfotipos de los cerebros de grupos ancestrales comunes.

Ciencia subsidiaria de la morfología, la neuroanatomía comparada busca descubrir las homologías y analogías entre grupos diversos. El concepto de homología expresa la correspondencia entre órganos o partes. Un órgano es homólogo a otro por lo que es, no por lo que hace. Por contra, la analogía designa similaridad de funciones. En el sistema nervioso central la homología ha de

extenderse a la posición, a las conexiones fibrosas (una masa celular neural podría cambiar sus conexiones sin perder su identidad morfológica), cualidad especial (por tal se entienden un tipo celular determinado, un neurotransmisor o enzimas particulares) y continuidad y similaridad a través de especies intermedias. Este último criterio se usa en morfología para descubrir homologías de estructuras que difieren en posición y cualidad especial, así como para excluir homologías de estructuras de forma y posición similares. Con estos criterios metodológicos se pasa revista exhaustiva en *The Central Nervous System* a los distintos grupos vertebrados.

Development and Flexibility, aunque manual escolar autónomo, es el cuarto de una serie de seis dedicados al cerebro. Los que le precedieron se centraban en la organización y funcionamiento del sistema nervioso maduro. Se consagra éste al desarrollo y capacidad de cambio. El cigoto consta de una célula, pero al nacer sólo el cerebro contiene ya unas 10^{11} neuronas. No se trata sólo de un crecimiento numérico. Hay que organizarlo. En un organismo en gestación, las neuronas crecen, se diferencian y se dirigen hacia su sitio adecuado para establecer contactos sinápticos e interaccionar con las estructuras que inervan. Se produce especificidad cuando determinadas neuronas se hallan siempre conectadas a dianas particulares. Cuando no existe esa relación de estricta dependencia hablamos de plasticidad neuronal.

El sistema nervioso comienza siendo un cordón vacío —un tubo neural— constituido por células del ectodermo. El tubo se ensancha en un extremo —que devendrá en prosencéfalo— y surgen dos pequeños engrosamientos detrás, que podemos identificar con rudimentos de mesencéfalo y telencéfalo. A las cinco o seis semanas, el tubo tiene que doblarse para acomodar su desarrollo en el interior del cráneo. Se produce una rauda sucesión de estructuras reconocibles. Al final del tercer mes los hemisferios cerebrales y cerebelares son evidentes, y se distinguen el tálamo, hipotálamo y otros núcleos. A lo largo del mes siguiente aumentan de tamaño los hemisferios cerebrales. La mayoría de los surcos y giros se dejan ver a finales del octavo mes. El pleno complemento adulto de neuronas sólo se da después del nacimiento.

¿Qué relación existe entre el desarrollo y plasticidad del cerebro y la mente? Hasta finales de los sesenta, gozó de predicamento la tesis behaviorista, según la cual el estímulo y la respuesta eran las únicas entidades observables y, por ende, dignas de inquisición científica. Carecía de sentido adentrarse en el terreno de los estados mentales. El advenimiento de la psicología cognitiva cambió las cosas. Propuso sacar a debate los mecanismos subyacentes bajos los fenómenos de percepción, atención, memoria, aprendizaje, lenguaje y resolución de problemas. Apelaba a la analogía del computador; para la nueva doctrina, la mente era al cerebro lo que la programación ("software") al soporte físico ("hardware").

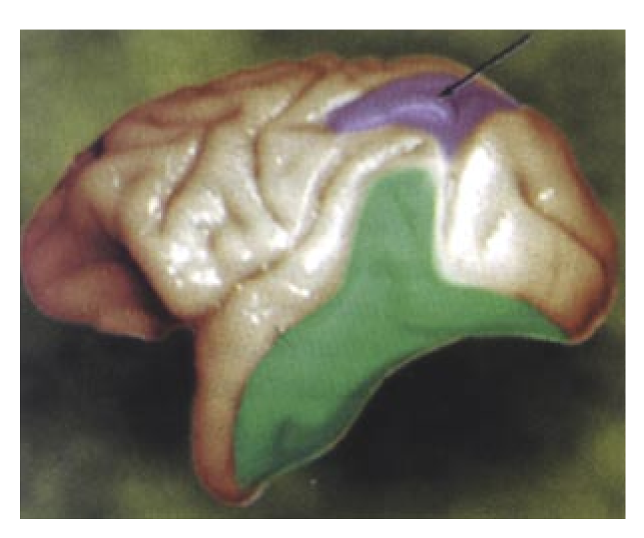
Aunque hizo fortuna la imagen, no goza de aplauso unánime, como se advierte en dos penetrantes aproximaciones al tema, *Toward a Science of Consciuosness* y *The Large, the Small and the Human Mind*. Compila aquélla las ponencias presentadas en la conferencia celebrada en Tucson en 1994 sobre la experiencia consciente, en tanto que la segunda es un sumario de las ideas de Roger Penrose sobre la mecánica cuántica de los fenómenos mentales.

En Tucson se habló de todo. La sección sobre neurociencias, por ejemplo, hizo hincapié en los resultados obtenidos de experimentos con animales y humanos. La noción comodín de la emergencia estuvo detrás de muchas posiciones y no sólo al detenerse en la organización jerárquica de los sistemas biológicos y las propiedades de las redes neurales. La mayoría de los congregados aceptaba que la ciencia tenía medios para explicar adecuadamente la conciencia. Una afirmación voluntarista, porque no se pudo especificar cuáles. Ni siquiera, en esto hubo acuerdo, sabían definirla.

Desde la filosofía de la mente, los lectores de la revista conocen la postura de David Chalmers: cualquier explicación reduccionista de la conciencia fracasará porque opera sin apelar a la experiencia humana y a la voluntad libre. Chalmers divide el problema central de la conciencia en dos subclases: problemas fáciles y problemas difíciles. Los fáciles, que pueden acometerse con el método científico al uso (neurología, computación), abarcan las diferencias entre sueño y vigilia, introspección y posibilidad de descripción. Los problemas difíciles tienen que ver con la experiencia subjetiva de los estados mentales y son justamente los que se resisten a entrar en la horma de ese método. El problema duro es tal porque no es un problema sobre la ejecución de una función; persiste aun cuando el desempeño de todas las funciones pertinentes quede justificado. La experiencia consciente surge cuando estas funciones se realizan, pero el hecho real de que surja es el misterio central. Hay un vacío explicativo entre las funciones y la experiencia; necesitamos un puente para salvar ese hiato.

Crick y Koch hallan, con su teoría neurobiológica, la base de la conciencia en ciertas oscilaciones de 35-75 hertz de la corteza cerebral, pues tales oscilaciones guardan correlación con la conciencia de modulaciones del sistema visual y el olfativo. Pero, responde Chalmers, ¿por qué esas oscilaciones dan origen a la experiencia? Si agudo en la crítica y en el planteamiento, Chalmers resulta menos diamantino en su teoría del doble aspecto, en la que la información (ingrediente básico del universo) presenta una vertiente física y una vertiente experiencial, que vendrían ligadas por lo que denomina coherencia estructural e invarianza organizadora.

De no menor calado parece la fundamentación cuántica de los procesos mentales. De acuerdo con la teoría cuán-



Vista lateral de cerebro de macaco. Los colores definen regiones que intervienen en distintas funciones superiores

tica, los átomos y las partículas subatómicas que componen nuestro cerebro no se encuentran en un sitio definido en un tiempo determinado. Igual que una moneda lanzada al aire es a la vez cara y cruz hasta que cae, las entidades cuánticas pueden existir en "superposición coherente" de estados. Pero la incertidumbre en el nivel cuántico rinde estructuras estables en nuestro micromundo: una transición conocida por colapso de la función de onda o reducción del vector de estado. La superposición cuántica continúa hasta que la observación consciente produce el colapso de la función de onda.

Danah Zohar traza paralelismos entre la naturaleza holística de la conciencia y ciertos aspectos de la teoría cuántica y describe fenómenos coherentes cuánticos macroscópicos (los condensados de Bose-Einstein) cuyos componentes individuales devienen coherentes e indivisibles. Zohar propone que esa coherencia acontece entre proteínas a través de importantes zonas del cerebro. Mediante correlación y unificación de actividades cerebrales dispersas, la coherencia cuántica podría, propugna, aportar mecanismos para la estructuración y sentido unitario del yo.

Pero el abanderado de la teoría cuántica de la conciencia es Roger Penrose. Las ideas de Penrose, avanzadas en *The Emperor's Mind* y *Shadows of the Mind*, han sido objeto de controversia y análisis; las resume y actualiza en *The Large, the Small and the Human Mind*, librito donde dialoga, además, con Abner Shimony, Nancy Cartwright y Stephen Hawking. Con este último, el más crítico de todos hasta el punto de rechazar que un físico tenga algo que decir sobre el problema de la conciencia, ha elaborado teoremas de cosmología relativista de la gravedad.

Para Penrose, los problemas de la mecánica cuántica y el problema de la conciencia se hallan entrelazados. La no-localidad y la coherencia cuántica sugieren en principio modos en que grandes zonas del cerebro podrían actuar de forma coherente. Penrose acepta el mundo de los absolutos platónicos, en particular la verdad matemática absoluta. Las cosas de que hablan los físicos son materia, objetos dotados de masa, partículas, espacio, tiempo, energía y otros de parejo tenor. ¿Qué tienen que ver con la física nuestras sensaciones, nuestra percepción de la rojez, nuestra felicidad?



Bernard Katz

En su argumentación, avisa, parte de tres prejuicios. En principio todo el mundo físico puede describirse en términos matemáticos, lo que no quiere decir que toda la matemática pueda emplearse para describir la física. Segundo: no afirma que cualquier fracción del mundo físico tenga mentalidad, sino que sugiere que no hay objetos mentales flotando por ahí que no se basen en la fisicalidad. Tercer prejuicio: en nuestra comprensión de la matemática, cualquier tema del mundo platónico es accesible para nuestra mente.

Reconocer que no sepamos en qué consiste la conciencia, no excluye que podamos tener cierta idea científica de la misma. Distingue dos aspectos; por un lado, tenemos las manifestaciones pasivas de la conciencia, que implican un advertir subjetivo, un darse cuenta, categoría en la que incluye las percepciones del color, las armonías, el uso de la memoria y similares; por otro lado están las manifestaciones activas, que implican el libre albedrío y las acciones de la voluntad. Busca, sin embargo, algo más esencial, diferente de los aspectos pasivos y activos, e incluso de lo que pudiera estar a medio camino de ambos. Lo identifica con la intuición intelectual. Hay algo, razona, en la operación física del cerebro que evoca la conciencia (el darse cuenta), pero que, no obstante ser física, no puede simularse en el computador, porque lo trasciende. Penrose reclama una nueva física, capaz de abarcar la acción del cerebro.

Llamemos intensidad de la sinapsis a su grado de fiabilidad en la transmisión de mensajes de una neurona a otra. Si todas las sinapsis tuvieran una fuerza fija, el cerebro se asemejaría bastante a un ordenador. Pero las intensidades de la sinapsis cambian. ¿Qué hacen las neuronas? Son células y, en cuanto tales, entidades muy refinadas. Un paramecio, un ser unicelular, puede nadar hacia la fuente de alimentación, retraerse ante el peligro, negociar los obstáculos y, aparentemente, aprender por experiencia. Todas estas son cualidades que pensaríamos requerirían un sistema nervioso, del que carece el paramecio; en este ser unicelular no hay neuronas. Dígase otro tanto de la ameba. ¿Cómo consiguen, pues, realizar tareas tan diversas y complejas?

Penrose sugiere mirar al citoesqueleto, estructura que controla las acciones de estos unicelulares. En el caso del paramecio, los cilios de los que se sirve para nadar se hallan en el extremo del citoesqueleto. En las neuronas los microtúbulos del citoesqueleto intervienen también en la determinación de la intensidad de la sinapsis, a través de la influencia que ejercen en las espinas dendríticas. Estas pueden extenderse, encogerse o cambiar de figura, modificaciones inducibles mediante alteraciones de la actina de su interior. Los microtúbulos influirían en la actina, que, a su vez, influiría en las propiedades dieléctricas de la sinapsis. Además, los microtúbulos modulan la intensidad de las sinapsis a través de su función transportadora de neurotransmisores a lo largo de los axones y dendritas, condicionando por tanto la concentración de esas sustancias en los terminales. Y, por último, influyen en el crecimiento y degeneración de las neuronas, alterando la red de las conexiones nerviosas.

La tubulina constituye la pieza fundante de los microtúbulos. Esa proteína muestra al menos dos conformaciones, dos estados diferentes, intercambiables. De acuerdo con Stuart Hameroff, los microtúbulos podrían comportarse como autómatas celulares y enviarse señales complejas

a través de los mismos. Un solo microtúbulo podría, por sí mismo, comportarse como un computador. Cada neurona contiene muchos conmutadores, muchos microtúbulos. La mecánica cuántica podría arrojar cierta luz sobre tales procesos. Puesto que hablamos de tubos, cabe atribuirles capacidad para aislar cuanto acontece en su interior. Y en su seno podría darse actividad cuántica coherente y a gran escala, algo muy parecido a un semiconductor. Veríase implicado un movimiento de masa significativo en la hipótesis exclusiva de que tal actividad comenzara a acoplarse con las conformaciones de tubulina, donde ahora el comportamiento del "autómata celular" sería, él mismo, sujeto de superposición cuántica.

Si la conciencia es algo global, prosigue Penrose, cualquier proceso responsable de la conciencia debería presentar un carácter esencialmente global. La coherencia cuántica satisface esa condición. Para que esa coherencia cuántica a gran escala sea posible necesitamos un alto grado de aislamiento, como el que pueden aportar las paredes de los microtúbulos. Sin embargo, se requiere algo más cuando intervienen las conformaciones de la tubulina. Este necesario aislamiento adicional del entorno pudiera aportarlo el agua que hay a extramuros de los microtúbulos. El agua ordenada, que sabemos que existe en las células, constituiría también un importante ingrediente de cualquier oscilación coherente cuántica que aconteciera en el interior de los tubos. Las oscilaciones cuánticas del interior de los tubos podría ir acoplada con la acción de los microtúbulos, a saber, la actividad de autómata celular.

La teoría del conocimiento no puede desligarse de una explicación de la mente. Ambas convergen en la fenomenología de la percepción, la formación de imágenes, la memoria y la introspección, la naturaleza de la inferencia, etcétera. Robert Audi busca esa confluencia en *Epistemology*. Manual introductorio, explica con ejemplos cotidianos los conceptos, teorías y problemas relativos a la comprensión del conocer y la justificación. (Epistemología viene de *episteme*, conocimiento, y *logos*, explicación.) La secuencia de los capítulos progresa de la génesis de la justificación y del conocimiento (primera parte) a su desarrollo y estructura (segunda) para llegar a la naturaleza y extensión de la justificación y el conocimiento (tercera).

Desde el *Menón* y el *Teeteto* de Platón los epistemólogos se han esforzado por identificar los componentes esenciales del conocer. Suele aceptarse la tríada estándar que define el conocimiento proposicional, es decir, la creencia verdadera justificada. La condición de creencia exige que quien conoce que *p* (donde *p* designa cualquier proposición o sentencia) cree que *p*. La creencia no es asentimiento a una proposición, sino un estado psicológico. Menos controvertida, la condición de verdad se ha centrado en la esquiva cuestión de qué sea la verdad, si una correspondencia con la realidad, si la coherencia interna de un sistema de proposiciones, si un valor cognoscitivo pragmático. Por fin, la condición de justificación: el cognoscente debe tener indicios sólidos de que una proposición es verdadera. Con otras palabras, debe tener una prueba.

Ante el conocimiento y la justificación podemos mostrarnos escépticos. Un escepticismo irrestricto del conocer sería proclamar que no conocemos nada; un escepticismo irrestricto de la justificación afirmaría que nunca estamos fundados para creer algo. Por lo común, el escepticismo suele ceñirse a un dominio particular: conocimiento del mundo externo, conocimiento de otras mentes, conocimiento del pasado o del futuro, conocimiento de asuntos que no pasan por la criba de la percepción, etcétera. ¿Cómo podemos especificar qué conocemos sin haber especificado cómo conocemos y cómo podemos especificar de qué modo conocemos sin haber especificado qué conocemos?

LUIS ALONSO

Bioética

Asignatura obligada

IMPROVING NATURE? THE SCIENCE AND ETHICS OF GENETIC ENGINEERING, por M. J. Reiss y R. Straughan, Cambridge University Press; Cambridge, 1996.

Entre los principios incluidos en la Declaración Universal de la UNESCO sobre el Genoma Humano y los Derechos Humanos, aprobada en 1997, algunos hacen referencia a la importancia de la bioética en diferentes aspectos. Así, señala la necesidad de promover la educación en bioética en todos los niveles; la de concienciar a los individuos y a la sociedad de su responsabilidad en la defensa de la dignidad humana en temas relacionados con la biología, la genética y la medicina; la de favorecer el debate sobre los principios incluidos en la Declaración, asegurando la libertad de expresión y la de promover la creación de Comités de Bioética.

Adelantándose a los deseos de la UNESCO, Michael J. Reiss y Roger Straughan —un biólogo y un filósofo moral— han escrito el presente libro, donde exponen las bases científicas de la ingeniería genética y sus aplicaciones en términos asequibles y reflexionan sobre las cuestiones éticas y morales que el progreso científico plantea.

Uno de los autores (R. S.) ha escrito varios libros sobre educación moral y sobre filosofía de la educación, así como numerosos artículos de investigación sobre aspectos éticos de la ingeniería genética. Esta especialización, unida en simbiosis con el correcto planteamiento de las bases científicas y técnicas aportado por el otro autor (M. J. R.), ha dado como fruto un libro muy aconsejable.

El libro está dividido en tres partes. La primera recoge las bases científicas de la ingeniería genética y las generalidades sobre los planteamientos éticos y morales. La segunda parte describe en capítulos separados las manipulaciones genéticas llevadas a cabo en microorganismos, plantas, animales y en humanos, tratando con cierto detalle algunos casos concretos y analizándolos a la luz de los principios éticos y morales establecidos en la primera parte del libro. Finalmente, en la tercera parte del libro se aborda la importancia de la educación pública en temas de ingeniería genética.

Hay quien dice que en ciencia todo lo que se puede hacer, se hará y que tratar de detener el progreso científico es como querer poner puertas al campo. De cualquier manera, es importante resaltar una vez más que no todo lo que es técnicamente posible es éticamente deseable. Ante la presión constante de los medios de comunicación, resulta fundamental que el ciudadano esté capacitado para tener su propio criterio y opinar libremente, aceptando o rechazando determinadas cuestiones planteadas por el progreso de la ingeniería genética, pero siempre con un conocimiento objetivo que evite caer en radicalismos de uno u otro signo.

JUAN RAMÓN LACADENA

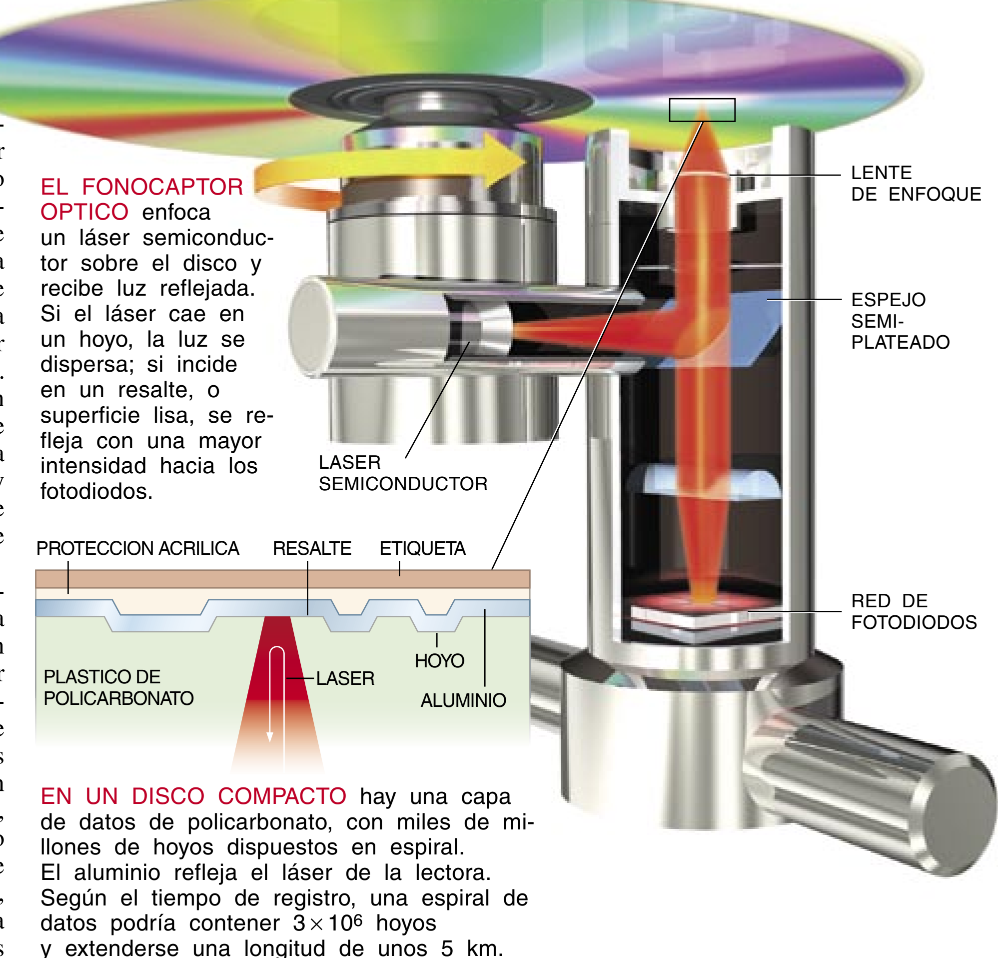
Ken C. Pohlmann

Lectoras de discos compactos

El lanzamiento del disco compacto, CD, y su reproductor en 1982 revolucionó el mundo del sonido al introducir la técnica digital óptica. A diferencia del disco de larga duración, LP, donde una aguja sigue el surco impreso en la superficie del disco, el reproductor CD recupera la información dirigiendo un haz láser concentrado a la cara inferior del disco. El disco sólo conoce el contacto con la luz; por eso, la reproducción de un CD no lo desgasta. Además, la calidad del sonido de un CD es muy alta y puede accederse rápidamente a la reproducción de cualquiera de sus partes.

Cuando se registra digitalmente música, ésta se descompone y representa en una serie de números que miden la amplitud de la señal fuente. Por breve que sea el sonido, su descripción reclama miles de números, que se codifican en binario (secuencias de ceros y unos) y se almacenan en forma de hoyos y superficies lisas, llamadas resaltes, ambos de tamaño microscópico, sobre la superficie de datos del disco. En la reproducción, el láser de la lectora CD se refleja en el disco giratorio con intensidades variables al incidir sobre hoyos y resaltes. Una red de fotodiodos detecta esas fluctuaciones y se traducen a ceros y unos. Dicho flujo binario, decodificado por demodulación y corrección de errores, se reconvierte en una señal eléctrica variable, la cual es amplificada y reproducida a través de auriculares o altavoces.

Se han introducido otros tipos de CD. El prototipo de sólo lectura, CD-ROM, almacena la información para ser leída primordialmente a través de un ordenador; otros formatos permiten grabar y borrar información sobre un disco. El formato DVD ("disco versátil digital") es el sucesor del CD y ya está generalizado su uso para almacenar películas de largo metraje con pistas de sonido multicanal. El CD y el DVD se basan en la misma técnica de almacenamiento óptica, pero el DVD ofrece una capacidad de almacenamiento muy superior.



EL FONOCAPTOR OPTICO enfoca un láser semiconductor sobre el disco y recibe luz reflejada. Si el láser cae en un hoyo, la luz se dispersa; si incide en un resalte, o superficie lisa, se refleja con una mayor intensidad hacia los fotodiodos.

EN UN DISCO COMPACTO hay una capa de datos de policarbonato, con miles de millones de hoyos dispuestos en espiral. El aluminio refleja el láser de la lectora. Según el tiempo de registro, una espiral de datos podría contener 3×10^6 hoyos y extenderse una longitud de unos 5 km.

a

122 0000000001111010
133 0000000010000101
143 0000000010001111
152 0000000010011000
160 0000000010100000
167 0000000010100111
173 0000000010101101
178 0000000010110010
182 0000000010110110
185 0000000010111001
187 0000000010111011
188 0000000010111100
188 0000000010111100
187 0000000010111011
184 0000000010111000
179 0000000010110011
174 0000000010101110
168 0000000010101000
160 0000000010100000
151 0000000010010111
140 0000000010001100
130 0000000010000010

b

AMPLITUD

TIEMPO

c

SEÑAL ELECTRICA

d

EL DECODIFICADO DEL DISCO. Hoyos y resaltes se traducen a ceros y unos (*a*). Ese flujo binario se compone de cadenas de 16 bits, cada una de las cuales codifica un valor numérico entre –32768 y +32767. Estos valores numéricos representan amplitudes en los puntos sucesivos de una onda (*b*). Un conversor de digital en analógico recibe esos números y produce una señal eléctrica variable (*c*). Esa señal pasa a un altavoz, donde se transforma en ondas sonoras (*d*).